

**TUGAS AKHIR**

**ANALISA NUMERIK DEFORMASI HORIZONTAL  
PADA TANAH LUNAK DENGAN PERKUATAN TANAH GRANULAR  
METODE SLUDGE LOCK**



**oleh**

**SABRI AHANDI**

**D111 09 308**

**JURUSAN SIPIL**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**2015**



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
UNIVERSITAS HASANUDDIN FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

KAMPUS TAMALANREA TELP. (0411) 587 536 FAX. (0411) 589 509 MAKASSAR 90245  
E-mail: sipil.unhas@yahoo.co.id

**LEMBAR PENGESAHAN**

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Judul : " *Analisa Numerik Deformasi Horizontal Pada Tanah Lunak Dengan Perkuatan Tanah Granular Metode Sludge Lock.* "

Disusun Oleh :

Nama : Sabri Ahandi

D111 09 308

Telah diperiksa dan disetujui  
Oleh Dosen Pembimbing

Makassar, 04 Maret 2015

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Dr.Ir.H.Lawalenna Samang, MS.M.Eng.  
Nip. 19601231 198503 1 001

Ariningsih Suprpti, ST., M.T.  
Nip. 19730712 200003 2002



Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Sipil,

Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT  
Nip. 19601231 198609 1 001

## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas ridho dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir yang berjudul “**Analisa Numerik Deformasi Horisontal Pada Tanah Lunak Dengan Perkuatan Tanah Granular Metode *Sludge Lock***”. Tugas akhir ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi pada program Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Tugas akhir ini dapat penulis selesaikan berkat bantuan, bimbingan, dan dukungan dari banyak pihak, sehingga melalui kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak memberikan dukungan, bantuan, dan bimbingan serta saran-saran yang sangat bermanfaat selama proses penulisan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat rahmat dan hidayahNya sehingga penulis dapat melangkah sejauh ini.
2. Kedua orang tua saya H. Sabang Nur dan Hj. Rostinah yang sangat saya sayangi dan saya banggakan yang telah dengan sabar merawat, membimbing dan mengajarkan akhlak yang baik.

3. Keluarga saya, khususnya saudara-saudara saya yang tercinta dr.Erdhalisa Rosanti dan Erhadianna Rosanti S.E yang terus memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS. M.Eng selaku Pembimbing I yang juga Ketua Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Periode 2010-2014 , yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahannya mulai dari awal hingga selesainya penulisan ini.
5. Ibu Ariningshi Suprapti, S.T.,M.T. selaku Pembimbing II, yang telah rela meluangkan waktu dan tenaga untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada penulis, dan selalu memberian senyuman walaupun penulis kadang datang tiba-tiba di kantor Ibu Ari tanpa pemberitahuan sebelumnya.
6. Dr. Ir. Muh. Arsyad Thaha, MT selaku Ketua Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Bapak Dr. Eng. Tri Harianto, ST., MT. dan Ibu Sitti Hijraini Nur, ST., MT., selaku Kepala dan Sekretaris Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. Prof. Dr. Ir. Mary Selintung, M.Sc. selaku penasehat akademik yang telah memberikan bimbingan dan nasihat dari sejak penulis semester pertama hingga semester akhir.
9. Segenap Dosen Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan staff, serta yang telah berjasa membagikan banyak ilmu pengetahuan kepada penulis dan membantu proses yang penulis lalui selama mengenyam pendidikan.

10. Sri Wahyuni Rasulong yang telah sabar untuk selalu mengingatkan dan memberi semangat agar segera merampungkan penulisan tugas akhir ini.
11. Teman-teman seangkatan dan seperjuangan saya, angkatan 2009, Dio, Adnan, Pudel, Madi, Acha, Siau, Jap, Ronal, Azwar, Munir, Salim, Rial, Andri, Callu', Titiek, Yuyun, Anti, Dian, dan semua yang tidak bisa saya sebut satu persatu dalam tulisan ini, terima kasih karena telah menemani melalui setiap tahapan di jurusan teknik sipil.
12. Sahabat saya di AIESEC UNHAS, *Executive Board* 12/13, 13/14 (RedForce) dan 14/15 (Archipelago) Erul, Dede, Emi, Adnan, Pudel, Ulan, Rusydan, Madi, Kak ahmad, Febri, Kak Evhy, Kak Ilham, Jihad, Icha, Kak Akino dan semua member-member AIESEC UNHAS yang masih menjadi member dan telah menjadi alumni, *push the boundaries to be the catalyst for change!*

Penulis menyadari bahwa dalam tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan penulisan tugas akhir ini.

Akhir kata penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat berguna bagi kita semuanya, terkhususkan dalam bidang teknik sipil.

Makassar, 31 Oktober 2014

Penulis

## ABSTRAK

Sabri Ahandi  
D111 09 308

### **“Analisa Numerik Deformasi Horisontal Pada Tanah Lunak Dengan Perkuatan Tanah Granular Metode *Sludge Lock*”**

Ketika *embankment* dibangun pada daerah perairan yang umumnya ditutupi dengan tanah yang sangat lunak, maka deformasi vertikal yang besar akan terjadi, tetapi juga jumlah yang signifikan dari deformasi horisontal dapat pula terjadi di sisi luar tanggul sehingga dapat memiliki efek buruk pada struktur di dekatnya, misalnya pondasi tiang pancang, kabel dan saluran. Karena itu pada tanah lunak tersebut harus distabilisasi atau diperkuat terlebih dahulu sebelum dipakai sebagai pondasi bangunan di atasnya.

Dalam usaha untuk memperbaiki stabilitas dari tanah lunak maka tanah granular dapat digunakan untuk perkuatan terhadap tanah tersebut dimana diketahui bahwa tanah granular merupakan material yang banyak terdapat di alam dan memiliki kuat geser yang baik. Pada penelitian ini tanah granular tersebut dimodelkan dalam bentuk *Sludge Lock* dimana *Sludge Lock* ini sebagai perkuatan yang terdiri dari pembangunan parit dibawah tapak *embankment* yang diisi dengan tanah granular untuk bertindak sebagai perlawanan pasif tambahan terhadap gaya yang menyebabkan ekstrusi sehingga dapat mereduksi besar deformasi horisontal yang terjadi pada tanah lunak di bawah *embankment*.

Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa perkuatan dengan metode *Sludge Lock* yang berisi tanah granular dapat meningkatkan angka stabilitas atau faktor keamanan dari *embankment* tersebut dan dapat mereduksi deformasi horisontal yang terjadi, dimana setiap penambahan kedalaman dari *Sludge Lock* dapat mereduksi deformasi horisontal lebih besar.

## ABSTRACT

Sabri Ahandi  
D111 09 308

### ***“Numerical Analysis of Horizontal Deformation in Soft Soil with Granular Soil Reinforcement using Sludge Lock Method”***

*When embankments are constructed on the sea area, which is generally covered with a very soft ground, large vertical deformations will occur but also a significant amount of horizontal deformations can be expected at the outer sides of the embankment. These deformations can have an adverse effect on nearby structures, for instance pile foundations, cables and ducts. Because of it, the soft soil must be stabilized or reinforced prior to use as the foundation of the embankment above.*

*To improve the stability of the soft soil, granular soils can be used for retrofitting to the land, where it is known that a granular soil material widely available in nature and has good shear strength. In this study, granular soils are modeled in the form of Sludge Lock, where the Sludge Lock as reinforcement consists of the construction of a trench within the footprint of the embankment to act as additional passive resistance to the forces causing extrusion so it can reduce the horizontal deformation that occurs in the soft ground under embankment.*

*From the test results indicate that the reinforcement method of Sludge Lock that containing granular soils increasing the rate stability or the safety factor of the embankment and reducing the horizontal deformation that occurs, wherein each additional depth of Sludge Lock can reduce horizontal deformation greater.*

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xvi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian .....	3
1.3.1 Maksud Penelitian .....	3
1.3.2 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4



1.6	Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>		<b>6</b>
2.1.	Isu Deformasi Horisontal pada <i>Embankment</i> .....	6
2.2.	Karakteristik Tanah Lunak dan Tanah Granular .....	9
2.2.1.	Sifat Fisis dan Teknis Tanah Pada Umumnya .....	9
2.2.2.	Sifat Fisis dan Teknis Tanah Lunak .....	20
2.2.3.	Sifat Fisis dan Teknis Tanah Granular .....	21
2.3.	Perkuatan <i>Embankment</i> di atas Pondasi Tanah Lunak .....	23
2.3.1.	Perkuatan untuk Mengontrol Stabilitas dari <i>Embankment</i> .....	23
2.3.2.	Perkuatan <i>Embankment</i> dengan Metode <i>Sludge Lock</i> .....	24
2.3.3.	Perkuatan Tanah dengan Geotekstil .....	25
2.4.	Prinsip Numerik Program Plaxis .....	27
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>34</b>
3.1	Lokasi Penelitian .....	34
3.2	Rancangan Penelitian .....	34
3.3	Parameter Desain Tanah dan Geotekstil .....	35
3.3.1	Parameter Teknis Tanah Lunak .....	35
3.3.2	Parameter Material <i>Sludge Lock</i> dan <i>Embankment</i> .....	37
3.3.3	Parameter Desain Geotekstil .....	38
3.4	Tahapan Pelaksanaan Penelitian .....	38

3.4.1	Model <i>Embankment</i> Tanpa Perkuatan .....	38
3.4.2	Model <i>Embankment</i> dengan Perkuatan .....	39
3.4.3	Simulasi Numerik dengan Program Plaxis .....	40
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>46</b>
4.1.	Karakteristik Material Tanah dan <i>Sludge Lock</i> .....	46
4.2.	Deformasi Numerik Lateral <i>Embankment</i> Tanpa Perkuatan .....	49
4.3.	Deformasi Numerik Lateral <i>Embankment</i> dengan Geotekstil – <i>Sludge Lock</i> .....	51
4.4.	Stabilitas Model <i>Embankment</i> Tanpa dan dengan <i>Sludge Lock</i> .....	54
<b>BAB V PENUTUP .....</b>		<b>57</b>
5.1.	Kesimpulan .....	57
5.2.	Saran .....	58
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>59</b>
Lampiran A .....		61
Lampiran B .....		64
Lampiran C .....		66
Lampiran D .....		67
Lampiran E .....		72
Lampiran F .....		77
Lampiran G .....		82

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Hubungan antara indeks plastis dengan tingkat plastisitas dan jenis tanah menurut Atterberg .....	14
2. Hubungan Antara Nilai Kohesi dan N-Values pada Tanah .....	15
3. Nilai Permeabilitas Berdasarkan Jenis Tanah .....	15
4. Nilai Modulus Young Untuk Jenis Tanah Kohesif .....	16
5. Nilai Modulus Young Untuk Jenis Tanah Granular .....	17
6. Kisaran Nilai Poisson Ratio Berdasarkan Jenis Tanah .....	18
7. Kisaran Nilai Sudut Geser Berdasarkan Jenis Tanah .....	19
8. Tabel Profil Tanah hasil Boring Pada Titik DH-S15 .....	36
9. Parameter Teknis Tanah Lunak .....	36
10. Parameter Tanah Granular Pengisi <i>Sludge Lock</i> dan <i>Embankment</i> .....	37
11. Parameter Geotextile GT100-I .....	38
12. Tabel Lapisan Tanah <i>Embankment</i> .....	39
13. Tahapan Konstruksi Lapisan Tanah <i>Embankment</i> .....	45
14. Parameter Material Tanah yang digunakan Pada Program Plaxis .....	46
15. Hasil deformasi horisontal terbesar potongan jarak 36m (A-A*) pada <i>Embankment</i> tanpa perkuatan .....	50
16. Hasil deformasi horisontal terbesar di setiap potongan pada	

	tanah lunak dengan berbagai model perkuatan .....	52
17.	Persentasi reduksi displacement berbagai model perkuatan .....	52
18.	Waktu konsolidasi pada embankment untuk masing-masing model perkuatan .....	54
19.	Hasil <i>phi/c-reduction</i> dari <i>Embankment</i> dengan berbagai model perkuatan .....	55

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Skema perilaku deformasi sebuah <i>embankment</i> pada tanah lunak .....	7
2. Ilustrasi dan contoh masalah tiang pancang yang rusak (Fellenius dan Johansson, 1972) .....	8
3. Deformasi horisontal berlebih pada jalur kereta api di Rotterdam (Termaten et al, 1992) .....	9
4. Tiga fase elemen tanah .....	10
5. Batas-batas Atterberg .....	13
6. Potongan melintang dari <i>embankment</i> yang menunjukkan konstruksi <i>Sludge Lock</i> .....	24
7. <i>Sludge Lock</i> yang sedang diisi dengan tanah granular .....	25
8. Galian <i>Sludge Lock</i> dan material pengisi dasar perkuatan .....	25
9. Pemasangan geotekstil pada proyek jalan .....	26
10. <i>Woven Geotextile</i> (anyaman) .....	27
11. <i>Woven Geotextile</i> (nir-anyam) .....	27
12. Diagram alir (flowchart) prosedur penelitian .....	35
13. Letak titik boring DH-S15 proyek pembangunan <i>Clicker Handling Terminal</i> PT. Semen Bosowa Maros .....	36
14. Model <i>embankment</i> tanpa perkuatan (Model A) .....	38
15. Model <i>embankment</i> dengan perkuatan <i>Sludge Lock</i> kedalaman 1 m	

	pada toe <i>embankment</i> (Model B) dengan bagian miring 1V:1H .....	39
16.	Model <i>embankment</i> dengan perkuatan <i>Sludge Lock</i> kedalaman 2 m pada toe <i>embankment</i> (Model C) dengan bagian miring 1V:1H .....	39
17.	Model <i>embankment</i> dengan perkuatan <i>Sludge Lock</i> kedalaman 3 m pada toe <i>embankment</i> (Model D) dengan bagian miring 1V:1H .....	40
18.	Pilihan pembuatan proyek baru pada program Plaxis V 8.5 .....	40
19.	Tampilan Menu General Setting pada Plaxis .....	41
20.	Tampilan Menu Material Sets untuk membuat dan mengatur material .....	42
21.	Tampilan menu pengaturan material dan parameter lapisan tanah .....	43
22.	Tampak lapisan tanah yang telah di isi dengan material dan telah di “generate mesh” .....	44
23.	Ilustrasi Tahapan Initial Condition .....	44
24.	Tampilan <i>Calculation Phase</i> .....	45
25.	Deformed mesh dari model geometri tanpa perkuatan (Model A) .....	48
26.	Deformed mesh dari model perkuatan <i>Sludge Lock</i> kedalaman 1m (Model B) .....	48
27.	Deformed mesh dari model perkuatan <i>Sludge Lock</i> kedalaman 2m (Model C) .....	48
28.	Deformed mesh dari model perkuatan <i>Sludge Lock</i> kedalaman 3m (Model D) .....	49
29.	Shading deformasi horisontal untuk Model A .....	49
30.	Grafik hubungan deformasi horisontal terhadap kedalaman tanah lunak	

	Pada embankment tanpa perkuatan potongan jarak 36m (A-A*) .....	50
31.	Shading deformasi horisontal untuk Model B .....	51
32.	Shading deformasi horisontal untuk Model C .....	51
33.	Shading deformasi horisontal untuk Model D .....	51
34.	Grafik hubungan deformasi horisontal terhadap kedalaman tanah lunak berbagai model perkuatan pada potongan jarak 36m (A-A*) .....	53
35.	<i>Shading</i> dari <i>total displacement increment</i> yang mengindikasikan mekanisme kegagalan yang dapat terjadi pada tahap akhir pembangunan <i>embankment</i> Model A .....	54
36.	<i>Shading</i> dari <i>total displacement increment</i> yang mengindikasikan mekanisme kegagalan yang dapat terjadi pada tahap akhir pembangunan <i>embankment</i> Model B .....	54
37.	<i>Shading</i> dari <i>total displacement increment</i> yang mengindikasikan mekanisme kegagalan yang dapat terjadi pada tahap akhir pembangunan <i>embankment</i> Model C .....	55
38.	<i>Shading</i> dari <i>total displacement increment</i> yang mengindikasikan mekanisme kegagalan yang dapat terjadi pada tahap akhir pembangunan <i>embankment</i> Model D .....	55
39.	Kurva Evaluasi dari hasil <i>phi/c-reduction</i> pada pembangunan dengan berbagai model perkuatan .....	56

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>LAMPIRAN A</b>	Hasil Boring Log dan SPT untuk Titik DH-S15
<b>LAMPIRAN B</b>	Tabel Spesifikasi Geotextile
<b>LAMPIRAN C</b>	Tabel Rekapitulasi Hasil Deformasi Horisontal Pada Berbagai Model Perkuatan
<b>LAMPIRAN D</b>	<i>Deformed Mesh</i> Keluaran Plaxis
<b>LAMPIRAN E</b>	<i>Shading Deformation</i> dari Hasil Deformasi Horisontal Keluaran Plaxis
<b>LAMPIRAN F</b>	Deformasi Horisontal Yang Terjadi Pada Potongan Arah Membujur Dari Lapisan Tanah Lunak
<b>LAMPIRAN G</b>	Hasil Analisa Keamanan Berupa <i>Shading</i> dari <i>Total Displacement Increment</i> dan Kurva <i>Phi/c-Reduction</i>



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Banyak kota di seluruh dunia berada di daerah-daerah yang memiliki potensi ekonomi yang tinggi karena lokasi strategis kota tersebut dekat dengan laut dan perairan. Namun di sisi lain, di daerah tersebut umumnya ditutupi dengan tanah yang sangat lunak.

Karena itu sangat banyak bangunan yang harus dibangun di atas tanah dengan kondisi yang lunak. Salah satu contohnya adalah pembangunan *Clinker Handling Terminal* PT. Semen Bosowa Maros yang berlokasi di Garongkong, Kabupaten Barru. Proyek ini dilakukan di daerah perairan, sehingga akan dilakukan reklamasi untuk pembuatan embankment pada proyek tersebut.

Lokasi pembangunan yang harus dilakukan di atas tanah yang lunak menimbulkan permasalahan pembangunan terutama masalah struktur di bawah bangunan tersebut. Salah satu contohnya adalah masalah deformasi. Permasalahan seperti ini banyak sekali pada pembangunan embankment seperti proyek *Clinker Handling Terminal* PT. Semen Bosowa Maros. Ketika *embankment* dibangun pada daerah perairan yang umumnya ditutupi dengan tanah yang sangat lunak, maka deformasi vertikal yang besar akan terjadi, tetapi juga jumlah yang signifikan dari deformasi horisontal dapat pula terjadi di sisi luar tanggul. Deformasi tersebut dapat memiliki efek buruk pada struktur di dekatnya, misalnya pondasi tiang pancang, kabel dan saluran. Karena itu pada tanah lunak tersebut harus distabilisasi atau diperbaiki terlebih dahulu sebelum dipakai sebagai pondasi bangunan di atasnya.

Dalam usaha untuk memperbaiki stabilitas dari tanah lunak maka tanah granular dapat digunakan untuk perkuatan terhadap tanah tersebut. Tanah granular merupakan material yang banyak terdapat di alam. Jenis tanah yang termasuk kedalam tanah granular yaitu pasir, kerikil, batuan dan campurannya. Sifat dari tanah granular tergantung pada ukuran dan bentuk butirannya. Semakin besar dan kasar permukaan butiran, semakin besar kuat gesernya. Oleh pengaruh gaya geser, butiran yang kecil mudah sekali menggelinding, sedang pada butiran yang besar, akibat geseran, butiran akan memaksa satu sama lain. Demikian pula mengenai gradasi, jika gradasi semakin baik, semakin besar kuat gesernya.

Salah satu contoh perkuatan dengan menggunakan tanah granular adalah perkuatan dengan metode *Sludge Lock*. *Sludge Lock* adalah metode untuk mencegah ekstrusi dari lapisan tanah lunak di bawah tanggul selama atau segera setelah proses konstruksi. *Sludge Lock* ini terdiri dari pembangunan parit dibawah tapak *embankment* yang diisi dengan tanah granular untuk bertindak sebagai perlawanan pasif tambahan terhadap gaya yang menyebabkan ekstrusi.

Karena itu peneliti mencoba melihat pengaruh dari perkuatan tanah granular dengan metode *Sludge Lock* terhadap deformasi horizontal yang mungkin terjadi pada proyek *Clinker Handling Terminal* PT. Semen Bosowa Maros dengan menggunakan program Plaxis V 8.5.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Munculnya persoalan deformasi pada tanah *embankment* di Indonesia, yang mungkin dapat terjadi pada proyek *Clinker Handling Terminal* PT. Semen Bosowa Maros, maka dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut;

1. Bagaimana deformasi numerik lateral *embankment* pada tanah lunak tanpa dan dengan perkuatan *Sludge Lock*?
2. Bagaimana tingkat stabilitas *embankment* pada tanah lunak tanpa dan dengan perkuatan *Sludge Lock*?

### **1.3. Maksud dan Tujuan Penelitian**

#### **1.3.1 Maksud Penelitian**

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui besar pengaruh tanah granular sebagai perkuatan terhadap deformasi horizontal pada tanah lunak yang dibuat dengan metode *Sludge Lock*.

#### **1.3.2 Tujuan Penelitian**

Menganalisis deformasi horizontal yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan tanah granular metode *Sludge Lock* menggunakan metode numerik dengan bantuan Plaxis 8.5.

### **1.4. Batasan Masalah**

Untuk mempermudah penyelesaian Tugas Akhir ini tanpa mengurangi bobot penelitian, maka dalam menyusun studi ini perlu diberikan batasan-batasan. Batasan masalah akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Analisis deformasi horizontal dengan perkuatan kolom granular menggunakan metode numerik dengan bantuan program Plaxis 8.5.
2. Lapisan tanah yang dijadikan sampel adalah lapisan tanah pada titik bor DH-S15 dari proyek *Clinker Handling Terminal* PT. Semen Bosowa Maros, yang berlokasi di Garongkong, Kabupaten Barru.

3. Dalam melakukan analisis deformasi horizontal, terlebih dahulu telah dilakukan penyelidikan lapangan dengan *Core Drilling* dan *Standard Penetration Test* (SPT) dan pengujian lab untuk mengetahui *Physical Properties* dan *Mechanical Properties* dengan metode ASTM dan Metode SNI.
4. Digunakan metode *Sludge Lock* sebagai metode perkuatan tanah lunak dengan menggunakan tanah granular.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

1. Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat diperoleh besar pengaruh perkuatan tanah granular dengan metode *Sludge Lock* terhadap deformasi horizontal yang terjadi pada tanah lunak di bawah bangunan *embankment*.
2. Sebagai bahan referensi bagi para peneliti dalam pengembangan dan pemanfaatan metode perbaikan deformasi horizontal pada pembangunan *embankment* yang berada di atas tanah lunak.

### **1.6. Sistematika Penulisan**

Penulisan ini dilakukan secara sistematis yang dirangkum dalam beberapa bab sebagai berikut:

#### **BAB I Pendahuluan**

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang, maksud penulisan, tujuan penulisan, ruang lingkup dan batasan masalah serta sistematika penulisan yang digunakan dalam tugas akhir ini sehingga dapat dipahami secara sistematis.

#### **BAB II Tinjauan Pustaka**

Bab ini berisi teori-teori dan rumus-rumus yang berhubungan dengan penelitian kami yang diperoleh dari studi literatur.

### **BAB III Metodologi Penelitian**

Merupakan bahan mengenai tahapan, pengumpulan data, variabel-variabel yang diukur, pemilihan lokasi, dan pengambilan data.

### **BAB IV Hasil dan Pembahasan**

Merupakan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh dari survey lapangan serta pembahasan dari hasil analisis yang diperoleh.

### **BAB V Penutup**

Merupakan bab penutup yang berisikan kesimpulan dari hasil analisis masalah dan disertai dengan saran-saran.

## **BAB II**

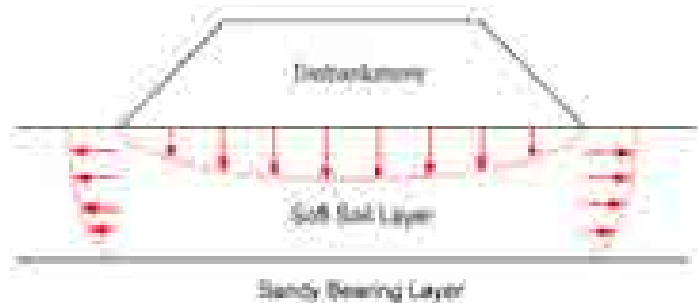
### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Isu Deformasi Horizontal pada *Embankment***

*Embankment* adalah salah satu konstruksi bangunan sipil yang telah lama ada, namun merupakan yang paling relevan hingga hari ini. *Embankment* dibutuhkan dalam konstruksi jalan, tanggul, landasan pacu bandara, dan rel kereta api. Secara historis, penempatan struktur *embankment* ini disarankan berada pada daerah dengan kualitas geoteknikal yang baik, dalam rangka untuk mengurangi masalah teknis serta mengurangi biaya yang terkait dengan konstruksi mereka (Leroueil et al., 1990). Namun, selama dekade terakhir pertimbangan sosial-ekonomi dan politik membuat banyak pembangunan harus dilakukan di daerah dimana memiliki kualitas geoteknikal yang buruk. Terlepas dari pengalaman berlebih dengan jenis konstruksi seperti ini, pembangunan *embankment* pada tanah kompresibel masih menimbulkan banyak masalah rumit. Sebagian besar masalah ini terkait dengan masalah stabilitas dan deformasi.

Masalah deformasi adalah masalah umum yang dapat dijumpai pada sebah *embankment*. Deformasi dapat berupa arah vertikal maupun horizontal seperti yang bisa dilihat pada Gambar 1. Dapat dilihat bahwa deformasi horizontal seperti halnya deformasi vertikal terdiri dari tiga komponen, yaitu: deformasi awal, deformasi akibat konsolidasi dan deformasi “*due to creep*” atau yang biasa disebut deformasi sekuler (Buisman, 1940). Selain itu, penting

untuk digaris bawahi bahwa proses tersebut bukanlah proses berturut-turut, karena deformasi sekuler berlangsung selama semua tahap konstruksi.



Gambar 1. Skema perilaku deformasi sebuah embankment pada tanah lunak

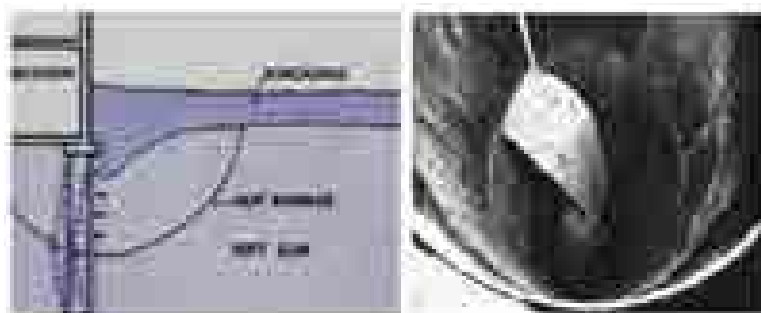
Deformasi awal adalah respon elastis sebagai akibat dari perubahan tegangan efektif di dalam tanah, dan sebagian besar dibandingkan dengan waktu konsolidasi dan deformasi sekuler. Menurut Folkes dan Crooks (1985) jumlah deformasi tanah horisontal tergantung pada sejumlah faktor; yaitu rasio antara tekanan horizontal dan vertikal, kompresibilitas, kepadatan dan riwayat tegangan tanah.

Deformasi horisontal yang besar dapat memiliki efek buruk pada tiang pancang, kabel, dan saluran yang terletak di sekitar bangunan *embankment*. Perpindahan horisontal ini menyebabkan adanya tambahan gaya dan momen pada misalnya suatu pondasi tiang pancang, yang kemudian dapat mengakibatkan kerusakan pada pondasi dan struktur atas (Jeong et al., 2004). Untuk alasan ini, besarnya deformasi horisontal harus dibatasi, terutama di lingkungan struktur yang sensitif terhadap deformasi. Diketahui bahwa jumlah kasus yang didokumentasikan di mana deformasi horisontal telah mengakibatkan masalah mungkin sedikit dan terbatas. Namun terlepas dari itu

beberapa kasus ditemukan di mana deformasi tanah horisontal telah menciptakan beberapa masalah dalam konstruksi bangunan.

Sebuah studi kasus di mana deformasi horisontal dianggap masalah utama dilaporkan oleh Stermac et al. (1968). Dia dan teman-temannya melihat deformasi lateral yang tidak biasa di dekat beberapa abutment jembatan di Quebec Kanada. Karena gerak lateral ini, *rocker bearings* tidak dapat secara benar mentransfer beban jembatan ke pondasi tiang pancang lagi. Hal ini menyebabkan beberapa retakan parah pada lapisan aspal jembatan.

Kasus yang luar biasa telah dibahas oleh Fellenius dan Johansson (1972) di mana tiang pancang sebuah bangunan telah melengkung karena gerakan tanah lateral yang berlebihan (lihat gambar 2). Kasus itu terjadi di dekat Huddinge Stockholm di mana penambahan beban menyebabkan gerakan horisontal yang cukup besar pada tanah lunak, yang memiliki kekuatan geser undrained sekitar 8,5 kPa. Penting untuk diperhatikan tekuk dari tiang pancang tidak terjadi secara instan, tetapi beberapa tahun setelah penambahan beban tersebut. Oleh karena itu mungkin bahwa akibat konsolidasi dan deformasi “*due to creep*” telah mengakibatkan kegagalan pada struktur tiang pancang.



Gambar 2. Ilustrasi dan contoh masalah dari tiang pancang yang rusak (Fellenius dan Johansson, 1972)5



Contoh lain dari deformasi horisontal yang berlebih ditemukan pada jalur kereta api di Rotterdam selama tahun 1970. Gambar 3 menunjukkan bahwa pembangunan tanggul dekat kereta api telah menyebabkan tikungan substansial pada rel yang sebelumnya lurus. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi horisontal terjadi memungkinkan terjadinya kegagalan. Menurut Marche dan Chapuis (1973) adalah mungkin untuk menghubungkan jumlah deformasi horisontal dengan faktor keamanan dalam analisis stabilitas.



Gambar 3. Deformasi horizontal berlebih pada jalur kereta api di Rotterdam

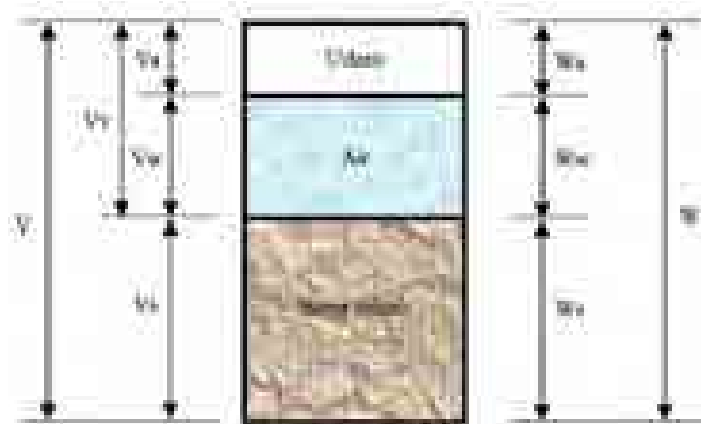
(Termaten et al., 1992)

## **2.2. Karakteristik Tanah Lunak dan Tanah Granular**

### **2.2.1. Sifat Fisis dan Teknis Tanah Pada Umumnya**

Tanah terdiri dari dua bagian, yaitu bagian padat dan bagian rongga. Bagian padat terdiri dari partikel-partikel padat, sedangkan bagian berongga terisi air atau udara sepenuhnya bila tanah tersebut jenuh atau kering. Apabila gumpalan tanah

tidak sepenuhnya dalam keadaan basah (jenuh), maka rongga tanah akan terisi oleh air dan udara. Keseluruhan bagian tersebut dapat terlihat dalam diagram fase sebagai berikut:



Gambar 4. Tiga Fase Elemen Tanah  
(sumber: Buku Mekanika Tanah, Braja M. Das Jilid 1)

Keterangan :

$V$  : volume total =  $V_a + V_w + V_s$

$V_a$  : volume udara (dalam bagian berongga)

$V_w$  : volume air (dalam bagian berongga)

$V_s$  : volume butir tanah

$V_v$  : volume rongga =  $V_a + V_w$

$W$  : berat total =  $W_s + W_w$

$W_s$  : berat butiran padat

$W_w$  : berat air

$W_a$  : berat udara = 0

Hubungan yang umum dipakai untuk suatu elemen tanah adalah :

1. Angka pori (void ratio)

Didefinisikan sebagai perbandingan antara volume rongga dengan volume butir tanah (bagian padat).

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

2. Porositas ( $n$ )

Menyatakan perbandingan antara volume pori dengan volume tanah total yang dinyatakan persen.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

3. Derajat kejenuhan ( $S$ )

Menyatakan perbandingan antara volume air dengan volume rongga.

$$S = \frac{V_w}{V}$$

4. Kadar air ( $W$ )

Disebut juga sebagai water content yang didefinisikan sebagai perbandingan antara berat air dengan berat air butiran padat dari volume tanah yang diselidiki.

$$W = \frac{W_w}{W_s}$$

5. Berat jenis tanah ( $G$ )

Menyatakan perbandingan antara berat isi butir tanah ( $\gamma_s$ ) dan berat isi air ( $\gamma_w$ ).

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

6. Berat isi air ( $\gamma_w$ )

Menyatakan perbandingan antara berat air ( $W_w$ ) dengan volume air ( $V_w$ )

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$$

7. Berat isi butir ( $\gamma_s$ )

Menyatakan perbandingan antara berat butiran tanah ( $W_s$ ) dengan volume butir tanah ( $V_s$ )

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

8. Berat isi tanah ( $\gamma$ )

Menunjukkan perbandingan antar berat tanah dengan isi tanah.

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

Rumus tersebut berlaku untuk berat volume basah.

9. Berat volume kering (dry unit weight)

Berat volume kering ( $\gamma_d$ ) adalah berat kering persatuan volume,

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

atau Hubungan antara berat volume, berat volume kering, kadar air adalah sebagai berikut :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + W}$$

10. Berat isi celup tanah ( $\gamma_{sub}$ )

Menyatakan suatu harga dari berat isi jenuh dikurangi berat isi air.

$$\gamma_{sub} = \frac{\gamma_w (G - 1)}{1 + e}$$

11. Batas-batas konsistensi (Atterberg Limits)

Batas-batas atterberg tergantung pada air yang terkandung dalam massa tanah, ini dapat menunjukkan beberapa kondisi tanah, seperti : cair – kental – plastis – semi plastis – padat, perubahan dari keadaan yang satu ke keadaan lainnya

sangat penting diperhatikan sifat fisiknya. Batas kadar air tanah dari keadaan satu menuju keadaan berikutnya dikenal sebagai batas-batas kekentalan / konsistensi. Menurut Hary Christady Hardiyatmo (2002) batas – batas Atterberg adalah sebagai berikut :

a. Batas cair (Liquid Limit) = LL

Menyatakan kadar air minimum dimana tanah masih dapat mengalir dibawah beratnya atau kadar air tanah pada batas antara keadaan cair ke keadaan plastis.

b. Batas plastis (Plastic Limit) = PL

Menyatakan kadar air minimum dimana tanah masih dalam keadaan plastis atau kadar air minimum dimana tanah dapat digulung-gulung sampai diameter 3,1 mm atau (1/8 inchi).

c. Batas susut (Shrinkage Limit) = SL

Menyatakan batas dimana sesudah kehilangan kadar air, selanjutnya tidak menyebabkan penyusutan volume tanah lagi. Batas-batas Atterberg tersebut seperti yang terlihat pada Gambar 5:

	LL	PL	SL
<b>Keadaan Cair</b>	<b>Keadaan Plastis</b>	<b>Keadaan Semi Plastis</b>	<b>Keadaan Padat</b>

Gambar 5. Batas – batas Atterberg  
(Sumber: Buku Mekanika Tanah, Braja M. Das Jilid 1)

d. Indeks Plastis (Plasticity Index) = PI

Menunjukkan sejumlah kadar air pada saat kondisi tanah dalam kondisi plastis, dimana harga ini adalah selisih antara batas cair dan batas plastis.

$$PI = LL - PL$$

Sedangkan hubungan Antara Indeks Plastis (Plasticity Index) dengan tingkat plastisitas dan jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hubungan Antara Indeks Plastis Dengan Tingkat Plastisitas dan Jenis Tanah Menurut Atterberg. (Sumber: Hary Christady Hardiyatmo, 2002)

PI	Tingkat Plastisitas	Jenis Tanah
0	Tidak plastis / Non PI	Pasir
$0 < PI < 7$	Plastisitas rendah	Lanau (Silt)
7 – 17	Plastisitas sedang	Silty – Clay
$> 17$	Plastisitas tinggi	Lempung (Clay)

Selain sifat tersebut di atas, perlu diketahui juga sifat mekanik atau *mechanical properties* dari tanah tersebut yang diantaranya:

1. Kohesi (Cohesion)

Merupakan daya rekat antara 1 partikel tanah dengan partikel lain. Kohesi sendiri tidak terdapat pada semua jenis tanah, misal pada pasir, kohesi nya kecil atau hampir tidak ada. Dan pada kerikil dan batuan bisa dipastikan  $c=0$ . Karena itu, bisa disimpulkan bahwa kohesi merupakan sifat tanah yang identik (lebih sering ditemui ) dengan jenis tanah lempung (clay). Oleh NAVAC, 1982 diberikan hubungan antara SPT N-value dan nilai kohesi tanah yang diringkas seperti:

Tabel 2. Hubungan Antara Nilai Kohesi dan N-Values pada Tanah. (Sumber: NAVAC, 1982)

Tipe Lempung	Kohesi (tsf)
Plastisitas tinggi (CH)	$c = 0.13 N$
Plastisitas sedang (CL)	$c = 0.076 N$
Plastisitas Rendah (SC-ML)	$c = 0.038 N$

## 2. Permeabilitas (Permeability)

Sifat ini untuk mengukur/menentukan kemampuan tanah dilewati air melalui pori-porinya. Sifat ini penting dalam konstruksi bendung tanah urugan (earth dam) dan persolan drainase. Adapun permeabilitas dari berbagai jenis tanah antara lain sebagai berikut:

Tabel 3. Nilai Permeabilitas Berdasarkan Jenis Tanah. (Sumber: *Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers*)

Description	USCS	min (m/s)	max (m/s)
Well graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GW	5.00E-04	5.00E-02
Poorly graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GP	5.00E-04	5.00E-02
Silty gravels, silty sandy gravels	GM	5.00E-08	5.00E-06
Clayey gravels, clayey sandy gravels	GC	5.00E-09	5.00E-06
Well graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SW	1.00E-08	1.00E-06
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SP	2.55E-05	5.35E-04
Silty sands	SM	1.00E-08	5.00E-06

Clayey sands	SC	5.50E-09	5.50E-06
Inorganic silts, silty or clayey fine sands, with slight plasticity	ML	5.00E-09	1.00E-06
Inorganic clays, silty clays, sandy clays of low plasticity	CL	5.00E-10	5.00E-08
Organic silts and organic silty clays of low plasticity	OL	5.00E-09	1.00E-07
Inorganic silts of high plasticity	MH	1.00E-10	5.00E-08
Inorganic clays of high plasticity	CH	1.00E-10	1.00E-07
Organic clays of high plasticity	OH	5.00E-10	1.00E-07
Peat and other highly organic soils	Pt	-	-

### 3. Modulus Elastisitas (Young Modulus)

Modulus elastisitas adalah angka yang digunakan untuk mengukur obyek atau ketahanan bahan untuk mengalami deformasi elastis ketika gaya diterapkan pada benda itu. Modulus elastisitas suatu benda didefinisikan sebagai kemiringan dari kurva tegangan-regangan di wilayah deformasi elastis. Bahan kaku akan memiliki modulus elastisitas yang lebih tinggi. Tanah juga memiliki nilai modulus elastisitas. Berikut adalah nilai modulus young dari berbagai jenis tanah:

Tabel 4. Nilai Modulus Young Untuk Jenis Tanah Kohesif. (Sumber: *Obrzud R. & Truty, The Hardening Soil Model - A Practical Guidebook Soil.PC 100701 report, revised 31.01.2012*)

USCS	Description	Very soft to soft	Medium	Stiff to very stiff	Hard
ML	Silts with slight plasticity	2.5 - 8	10 - 15	15 - 40	40 - 80
ML, CL	Silts with low plasticity	1.5 - 6	6 - 10	10 - 30	30 - 60



CL	Clays with low-medium plasticity	0.5 - 5	5 - 8	8 - 30	30 - 70
CH	Clays with high plasticity	0.35 - 4	4 - 7	7 - 20	20 - 32
OL	Organic silts	-	0.5 - 5	-	-
OH	Organic clays	-	0.5 - 4	-	-

Tabel 5. Nilai Modulus Young Untuk Jenis Tanah Granular. (Sumber: *Obrzud R. & Truty, The Hardening Soil Model - A Practical Guidebook Soil.PC 100701 report, revised 31.01.2012*)

USCS	Description	Loose	Medium	Dense
GW, SW	Gravels/Sand well-graded	30 - 80	80 - 160	160 - 320
SP	Sand, uniform	10 - 30	30 - 50	50 - 80
GM, SM	Sand/Gravel silty	7 - 12	12 - 20	20 - 30

#### 4. Kosolidasi (Consolidation)

Pada konsolidasi dihitung dari perubahan isi pori tanah akibat beban. Sifat ini dipergunakan untuk mengetahui keruntuhan. sifat ini diperhitungkan untuk menentukan penurunan (settlement).

#### 5. Poisson Ratio

Poisson's Ratio adalah sebuah konstanta elastik yang merepresentasikan sifat fisis batuan. Seperti contoh sebuah sampel batuan yang berbentuk selinder dengan panjang  $L$  dan jari-jari  $R$ . Apabila sampel tersebut ditekan dengan gaya berkekuatan  $F$  maka karena tekanan tersebut panjang sample akan memendek dan jari-jarinya akan melebar. Jika perubahan panjangnya adalah  $dL$  dan perubahan

jari-jarinya adalah  $dR$ , maka besaran Poisson's Ratio adalah  $dR/dL$ . Berikut adalah nilai dari poisson ration dari berbagai jenis tanah:

Tabel 6. Kisaran Nilai Poisson Ratio Berdasarkan Jenis Tanah. (Sumber: *Foundation Analysis and Design (5th Edition)*, by J.E. Bowles, 1996 McGraw-Hill)

Type of soil	Poisson Ratio ( $\nu$ )
Clay (saturated)	0.4 – 0.5
Clay (unsaturated)	0.1 – 0.3
Sandy clay	0.2 to 0.3
Silt	0.3 to 0.35
Sand, gravelly sand	0.1 to 1.0 (not elastic but 0.3 to 0.4 commonly used)
Rock	0.1 to 0.3
Loess	0.1 to 0.3

#### 6. Tegangan geser (*Shear Strength*)

Untuk menentukan kemampuan tanah menahan tekanan tanpa mengalami keruntuhan. Sifat ini dibutuhkan dalam perhitungan stabilitas pondasi/dasar yang dibebani, stabilitas tanah isian/timbunan di belakang bangunan penahan tanah dan stabilitas timbunan tanah.

#### 7. Sudut geser (*Angle of Friction*)

Sudut geser tanah ( $\phi$ ) merupakan tahanan terhadap pergeseran antara partikel tanah. Nilai sudut geser ini beserta nilai kohesi mempengaruhi nilai

kekuatan geser tanah tersebut. Seperti yang kita ketahui bahwa kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Nilai kekuatan geser tanah menunjukkan besarnya kekuatan daya dukung tanah tersebut. Adapun kisaran nilai sudut geser berbagai jenis tanah antara lain sebagai berikut:

Tabel 7. Kisaran Nilai Sudut Geser Berdasarkan Jenis Tanah. (Sumber: *Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers*)

Description	USCS	Soil friction angle [°]	
		min	max
Well graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GW	33	40
Poorly graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GP	32	44
Silty gravels, silty sandy gravels	GM	30	40
Clayey gravels, clayey sandy gravels	GC	28	35
Well graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SW	33	43
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SP	30	39
Silty sands	SM	32	35
Clayey sands	SC	30	40
Inorganic silts, silty or clayey fine sands, with slight plasticity	ML	27	41
Inorganic clays, silty clays, sandy clays of low plasticity	CL	27	35
Organic silts and organic silty clays of low plasticity	OL	22	32
Inorganic silts of high plasticity	MH	23	33
Inorganic clays of high plasticity	CH	17	31
Organic clays of high plasticity	OH	17	35

### 2.2.2. Sifat Fisis dan Teknis Tanah Lunak

Tanah lunak atau lempung dapat didefinisikan sebagai susunan partikel yang ukurannya kurang dari 0.002 mm (Das, 1995). Menurut Hardiyatmo (2010), sifat-sifat yang ada pada tanah lempung adalah ukuran butiran-butiran halus >0,002 mm, permeabilitas rendah, kenaikan air kapiler yang tinggi, bersifat sangat kohesif, kadar kembangsusut yang tinggi dan proses konsolidasi lambat.

Tanah lempung memiliki sifat dan perilaku yang terlihat pada komposisi mineral, unsur-unsur kimia dan partikel-partikelnya serta pengaruh lingkungan disekitarnya. Dalam memahami sifat dan perilaku tanah lempung maka diperlukan pengetahuan tentang mineral dan komposisi kimia lempungnya, karena ini merupakan mineralogi yang merupakan faktor utama untuk dapat mengontrol ukuran, bentuk dan sifat serta kimia dari partikel tanah. Tanah lempung memiliki sifat yang khas yaitu apabila dalam keadaan kering dia akan bersifat keras, dan jika basah akan bersifat lunak plastis, dan kohesif, mengembang dan menyusut dengan cepat, sehingga mempunyai perubahan volume yang besar dan itu terjadi karena pengaruh air.

Ada beberapa hal istilah yang perlu dibedakan dalam mempelajari mengenai lempung yaitu:

- a. Penggunaan istilah ukuran lempung, lebih dihubungkan dengan komposisi dari ukuran partikel, yang biasanya berukuran  $< 2\mu\text{m}$ .
- b. Penggunaan istilah mineral lempung, lebih dihubungkan dengan komposisi ukuran mineral. Ukuran mineral ini lebih spesifik, kadang-kadang ukuran mineral ini  $< 2\mu\text{m}$  dan dapat pula  $> 2\mu\text{m}$ , meskipun pada umumnya  $< 2\mu\text{m}$ .

Partikel lempung berasal dari pelapukan tanah yang berupa susunan kelompok partikel berukuran koloid dengan diameter butiran lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel lempung berbentuk seperti lembaran yang mempunyai permukaan khusus, sehingga lempung mempunyai sifat sangat dipengaruhi oleh gaya-gaya permukaan. Terdapat banyak mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung. Di antaranya terdiri dari kelompok-kelompok: *montmorillonite*, *illite*, *kaolinite*, dan *polygorskite*. Terdapat juga kelompok yang lain, misalnya: *chlorite*, *vermiculite*, dan *halloysite* (Hardiyatmo, 2010). Umumnya, terdapat kira-kira 15 macam mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung.

### **2.2.3. Sifat Fisis dan Teknis Tanah Granular**

Tanah granular adalah tanah berbutir kasar tidak mempunyai komponen kohesi ( $c=0$ ), maka kuat gesernya hanya bergantung pada gesekan antar butiran tanah. Tanah granular, seperti pasir, kerikil, batuan, dan campurannya, mempunyai sifat-sifat teknis yang sangat baik. Sifat-sifat tanah tersebut antara lain (Hardiyatmo, 2002):

1. Merupakan material yang baik untuk mendukung bangunan dan badan jalan, karena mempunyai kapasitas dukung yang tinggi dan penurunan kecil, asalkan tanahnya relatif padat. Penurunan terjadi segera sesudah penerapan beban. Jika dipengaruhi getaran pada frekuensi tinggi, penurunan besar dapat terjadi pada tanah yang tidak padat.
2. Merupakan material yang baik untuk tanah urug pada dinding penahan tanah, struktur bawah tanah, dan lain-lain, karena menghasilkan tekanan

lateral yang kecil. Mudah dipadatkan dan merupakan material untuk drainasi yang baik, karena lolos air.

3. Tanah yang baik untuk timbunan, karena mempunyai kuat geser yang tinggi
4. Bila tidak dicampur dengan material kohesif, tidak dapat digunakan sebagai bahan tanggul, bendungan, kolam, dan lain-lain, karena permeabilitasnya besar. Galian pada tanah granular yang terendam air perlu penanganan yang baik.
5. Kuat geser dan kompresibilitas tanah granular tergantung dari kepadatan butiran yang biasanya dinyatakan dalam kerapatan relatif ( $D_r$ ). Kerapatan relatif dapat ditentukan dari uji penetrasi, contohnya alat uji penetrasi standard (SPT).
6. Tanah granular tergantung pada ukuran dan bentuk butirannya. Semakin besar dan kasar permukaan butiran, semakin besar kuat gesernya. Oleh pengaruh gaya geser, butiran yang kecil mudah sekali menggelinding, sedang pada butiran yang besar, akibat geseran, butiran akan memaksa satu sama lain. Demikian pula mengenai gradasi, jika gradasi semakin baik, semakin besar kuat gesernya.
7. Kapasitas dukung dalam kepadatan sedang atau besar mempunyai kapasitas dukung yang tinggi. Tanah pasir merupakan material granular yang mempunyai kapasitas dukung dan kompresibilitas yang sama seperti kerikil. Namun, jika tidak padat nilai kapasitas dukung izinnya menjadi rendah oleh persyaratan besarnya penurunan.

### **2.3. Perkuatan Embankment di atas Pondasi Tanah Lunak**

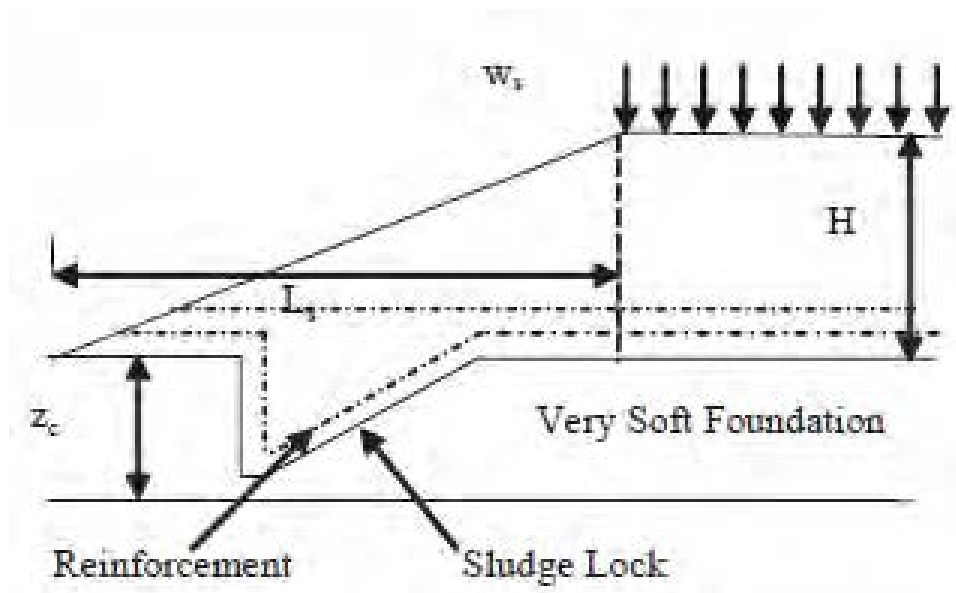
#### **2.3.1. Perkuatan untuk Mengontrol Stabilitas dari Embankment**

Stabilitas dari sebuah *embankment* yang dibangun di tanah atas lunak sebagian besar dipengaruhi oleh tahanan geser dari pondasi, dan pembangunan *embankment* pada tanah lunak merupakan permasalahan daya dukung. Penguatan dapat ditempatkan pada level pondasi untuk mencegah keruntuhan geser pada isi tanggul dan pada lapisan tanah. Stabilitas *embankment* pada tanah lunak merupakan hal yang paling penting selama konstruksi. Hal ini karena permeabilitas yang relatif rendah dari tanah dasar yang lunak tidak mengizinkan konsolidasi penuh pada skala waktu normal saat konstruksi. Pada akhir konstruksi dari *embankment* beban telah diterapkan, namun tahanan geser yang dicapai pondasi karena konsolidasi mungkin tidak cukup untuk stabilitas dari *embankment* tersebut.

Setelah konsolidasi terjadi, peningkatan yang dihasilkan pada tahanan geser di pondasi biasanya akan menghilangkan kebutuhan untuk penguatan dalam meningkatkan stabilitas. Dengan demikian selama periode antara akhir konstruksi dan konsolidasi dari pondasi, kekuatan yang disyaratkan dari perkuatan pada setiap desain adalah sama atau melebihi beban desain. Dasar penguatan menstabilkan timbunan diatas tanah lunak dengan mencegah penyebaran gaya lateral pada isi tanah, ekstrusi dasar dan kegagalan rotasi secara keseluruhan. Kekuatan stabilisasi ini dihasilkan dalam penguatan dengan cara tegangan geser ditransmisikan dari tanah pondasi dan isi yang menempatkan penguatan dalam tegangan.

### 2.3.2. Perkuatan *Embankment* dengan Metode *Sludge Lock*

*Sludge Lock* adalah metode untuk mencegah ekstrusi dari lapisan tanah lunak di bawah tanggul selama atau segera setelah proses konstruksi. *Sludge Lock* ini terdiri dari pembangunan parit dibawah tapak *embankment* yang diisi dengan tanah granular untuk bertindak sebagai perlawanan pasif tambahan terhadap gaya yang menyebabkan ekstrusi. Parit harus dikombinasikan dengan solusi penguatan diperlukan untuk stabilitas tanggul.



Gambar 6. Potongan melintang dari *embankment* yang menunjukkan konstruksi *Sludge Lock*.

Berdasarkan pengalaman sebelumnya di lapangan, pembangunan lapisan awal untuk *embankment* akan mengambil dua sampai tiga hari yang berbeda dengan pembangunan *Sludge Lock* yang mengambil rata-rata sekitar tujuh sampai sepuluh hari hingga selesai. Meskipun demikian, waktu yang dibutuhkan untuk menggali *Sludge Lock* lebih singkat dan lebih murah dibanding menggali dan membuang seluruh tanah lunak serta menggantinya dengan tanah granular yang sesuai. Dalam hal ini, *Sludge Lock* terbukti memiliki keuntungan yang berbeda.





Gambar 7. *Sludge Lock* yang sedang diisi dengan tanah granular



Gambar 8. Galian *Sludge Lock* dan material pengisi dasar perkuatan

### 2.3.3. Perkuatan Tanah dengan Geotekstil

Geotekstil adalah lembaran sintesis yang tipis, fleksibel, permeable yang digunakan untuk stabilisasi dan perbaikan tanah dikaitkan dengan pekerjaan teknik

sipil. Pemanfaatan geotekstil merupakan cara moderen dalam usaha untuk perkuatan tanah lunak. Beberapa fungsi dari geotekstil yaitu:

- untuk perkuatan tanah lunak,
- untuk konstruksi teknik sipil yang mempunyai umur rencana cukup lama dan mendukung beban yang besar seperti jalan rel dan dinding penahan tanah,
- sebagai lapangan pemisah, penyaring, drainase dan sebagai lapisan pelindung.

Geotextile dapat digunakan sebagai perkuatan timbunan tanah pada kasus:

- Timbunan tanah diatas tanah lunak
- Timbunan diatas pondasi tiang
- Timbunan diatas tanah yang rawan subsidence



Gambar 9. Pemasangan geotekstil pada proyek jalan

Jenis geotextile ada 2 ,yaitu;

1. Woven Geotextile (Anyaman)



Gambar 10. Woven Geotextile (anyaman)

## 2. Non-Woven Geotextile (Nir-Anyam)



Gambar 11. Non-Woven Geotextile (nir-anyam)

Penggunaan Woven Geotextile akan memberikan hasil yang lebih baik sebab arah gaya dapat disesuaikan dengan arah serat, sehingga deformasi dapat dikontrol dengan baik. Pada non-Woven Geotextile arah serat dalam struktur geotextile tidak terarah, sehingga apabila dibebani, maka akan terjadi deformasi yang sangat besar, dan sulit dikontrol.

### 2.4. Prinsip Numerik Program Plaxis

Plaxis adalah sebuah paket program yang disusun berdasarkan metode elemen hingga yang telah dikembangkan secara khusus untuk melakukan analisis

deformasi dan stabilitas dalam bidang rekayasa geoteknik. Prosedur pembuatan model secara grafis yang mudah memungkinkan pembuatan suatu model elemen hingga yang rumit dapat dilakukan dengan cepat, sedangkan berbagai fasilitas yang tersedia dapat digunakan untuk menampilkan hasil komputasi secara mendetail.

Matriks kekakuan  $\mathbf{K}$ , menyatakan perilaku material secara pendekatan. Semakin akurat matriks kekakuan, semakin sedikit jumlah iterasi yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan dalam toleransi tertentu. Dalam bentuknya yang paling sederhana,  $\mathbf{K}$  menyatakan respon linier elastis. Dalam kasus ini matriks kekakuan dapat diformulasikan sebagai :

$$\mathbf{K} = \int \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D}^e \cdot \mathbf{B} \, dV \text{ (matriks kekakuan elastis)}$$

dimana  $\mathbf{D}^e$  adalah matriks kekakuan elastis dari material menurut hukum Hooke dan  $\mathbf{B}$  adalah matriks interpolasi regangan. Penggunaan matriks kekakuan elastis akan menghasilkan prosedur iterasi yang handal selama kekakuan material tidak meningkat, bahkan saat menggunakan model plastisitas yang tidak terasosiasi. Teknik khusus seperti kontrol panjang busur (Riks, 1979), relaksasi berlebih dan ekstrapolasi (Vermeer & Van Langen 1989) dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja proses iterasi. Selain itu, prosedur peningkatan ukuran langkah otomatis, seperti diperkenalkan oleh Van Langen & Vermeer (1990), dapat digunakan untuk meningkatkan penggunaan aplikasi dalam praktek. Untuk model material dengan perilaku linier dalam daerah elastis, seperti model Mohr-Coulomb standar, penggunaan matriks kekakuan elastis secara khusus lebih diinginkan, karena matriks kekakuan hanya perlu untuk dibentuk dan didekomposisi sebelum langkah



Aplikasi geoteknik umumnya membutuhkan model konstitutif tingkat lanjut untuk memodelkan perilaku tanah maupun batuan yang non-linear, bergantung pada waktu serta anistropis. Program Plaxis dilengkapi oleh beberapa fitur untuk menghadapi berbagai aspek struktur dan geoteknik yang kompleks. Ringkasan mengenai fitur-fitur penting dalam Plaxis antara lain adalah sebagai berikut.

**Pembuatan model geometri secara grafis :** Masukan berupa pelapisan tanah, elemen-elemen struktur, tahapan konstruksi, pembebanan serta kondisi-kondisi batas dilakukan dengan menggunakan prosedur grafis yang mudah dengan bantuan computer, yang memungkinkan pembuatan model geometri berupa penampang melintang yang mendetail. Dari model geometri ini jaring elemen hingga 2D dapat dengan mudah dibentuk.

**Pembentukan jaring elemen secara otomatis :** Plaxis secara otomatis akan membentuk jaring elemen hingga 2D yang acak dengan pilihan untuk memperhalus jaring elemen secara global maupun lokal. Program penyusun jaring elemen hingga 2D merupakan versi khusus dari program Triangle.

**Elemen ordo tinggi :** Tersedia elemen segitiga kuadratik dengan 6 buah titik nodal dan elemen segitiga ordo keempat dengan 15 buah titik nodal untuk memodelkan deformasi dan kondisi tegangan dalam tanah.

**Pelat :** Elemen balok khusus dapat digunakan untuk memodelkan lentur dari dinding penahan, lining terowongan, elemen cangkang serta struktur-struktur tipis lainnya. Perilaku dari elemen-elemen ini diatur oleh kekakuan lentur, kekakuan arah normal penampang dan momen lentur batas. Sendi plastis dapat digunakan untuk elemen pelat yang bersifat elastoplastis saat momen batas

termobilisasi. Elemen pelat dengan antarmuka dapat digunakan untuk melakukan analisis yang realistis dari struktur-struktur geoteknik.

**Antarmuka** : Elemen antar muka atau elemen penghubung dapat digunakan untuk memodelkan interaksi tanah-stuktur. Sebagai contoh, elemen-elemen ini dapat digunakan untuk memodelkan zona tipis diantara lining terowongan dengan tanah disekelilingnya yang mengalami intensitas geser yang tinggi. Nilai sudut geser dan kohesi dari elemen antarmuka umumnya berbeda dengan nilai sudut geser dan kohesi dari tanah disekitarnya.

**Angkur** : Elemen pegas elastoplastis digunakan untuk memodelkan pengankuran dan penopang horizontal. Perilaku elemen-elemen ini diatur oleh kekakuan normal penampang dan sebuah gaya maksimum. Sebuah pilihan khusus juga tersedia untuk analisis pada ankur tanah prategang ataupun system penopang prategang lainnya pada galian.

**Geogrid** : Geogrid (geotekstil) sering digunakan dalam praktek untuk timbunan yang membutuhkan perkuatan atau untuk struktu penahan tanah. Elemen-elemen ini dapat dimodelkan dalam Plaxis dengan menggunakan elemen-elemen yang khusus untuk menahan gaya tarik. Elemen ini juga dapat dikombinasikan dengan elemen antarmuka untuk memodelkan interaksi dengan tanah disekelilingnya.

**Model Mohr-Coulomb** : Model yang sederhana namun handal ini didasarkan pada parameter-parameter tanah yang telah dikenal dengan baik dalam praktek rekayasa teknik sipil. Walaupun demikian, tidak semua fitur non-linear tercakup dalam model ini. Model Mohr-Coulomb dapat digunakan untuk

menghitung tegangan pendukung yang realistis pada muka terowongan, beban batas pada pondasi dan lain-lain. Model ini juga dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan dengan menggunakan pendekatan '*reduksi phi-c*'.

**Model tanah dari pengguna :** Sebuah fitur khusus dalam Plaxis Versi 8 adalah pilihan untuk membuat suatu model tanah yang didefinisikan oleh pengguna. Fitur ini memungkinkan pengguna untuk menerapkan model tanah yang didefinisikan sendiri oleh pengguna dalam perhitungan. Pilihan ini ditujukan terutama untuk para peneliti dan ilmuwan di perguruan-perguruan tinggi dan pusat-pusat penelitian, tetapi tetap dapat berguna juga untuk para praktisi. Dalam tahun-tahun mendatang, model-model tanah yang didefinisikan sendiri oleh pengguna dan yang telah divalidasi diharapkan dapat tersedia melalui jaringan internet.

**Tekanan air pori hidrostatik :** Distribusi tekanan air pori yang kompleks dapat dihitung berdasarkan elevasi dari grafis freatik atau masukan langsung berupa nilai-nilai tekanan air. Sebagai alternatif, perhitungan aliran air statis dalam tanah dapat dilakukan untuk memperoleh distribusi tekanan air pori pada amasalah-masalah aliran statis atau rembesan.

**Analisis konsolidasi :** Semakin berkurangnya tekanan air pori berlebih terhadap waktu dapat dihitung dengan menggunakan sebuah analisis konsolidasi. Suatu perhitungan konsolidasi membutuhkan masukan berupa koefisien permeabilitas tanah untuk tiap lapisan tanah. Penggunaan prosedur peningkatan langkah waktu secara otomatis akan membuat analisis menjadi mudah dilakukan namun tetap handal.



**Tampilan dari keluaran :** Program plaxis memiliki fitur-fitur grafis yang sangat baik untuk menampilkan hasil-hasil dari perhitungan. Nilai-nilai perpindahan, tegangan, regangan dan gaya-gaya dalam dari elemen struktural dapat diperoleh dari tabel keluaran. Keluaran berbentuk grafis maupun tabel dapat langsung dicetak, disimpan ke media penyimpanan ataupun langsung ke dalam memori clipboard dari windows untuk dapat digunakan dalam perangkat lunak lain.

**Lintasan tegangan :** Sebuah pilihan khusus tersedia untuk menggambarkan kurva beban terhadap perpindahan, lintasan tegangan atau jalur tegangan, lintasan regangan, kurva tegangan-regangan serta kurva penurunan terhadap waktu. Visualisasi dari lintasan tegangan akan memberikan informasi yang berharga terhadap perilaku tanah secara lokal dan memungkinkan analisis yang mendetail terhadap hasil dari perhitungan dengan menggunakan Plaxis.

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

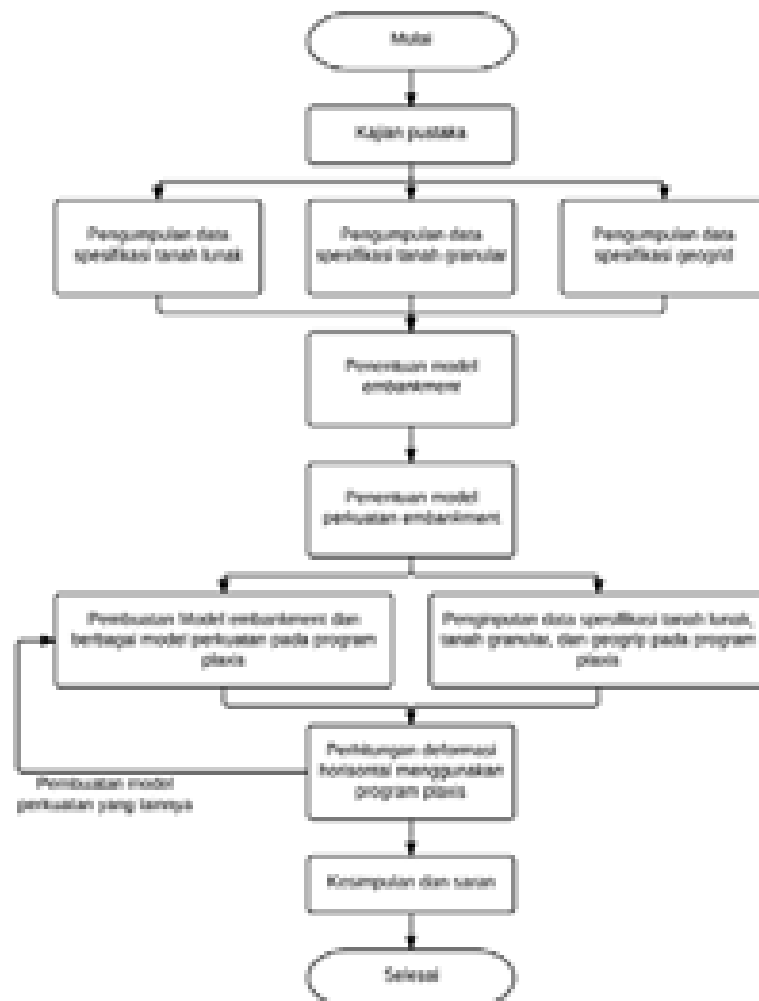
#### **3.1. Lokasi Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin dengan mengumpulkan parameter lapisan tanah lunak yang diperoleh dari proyek pembangunan *Clinker Handling Terminal* PT. Semen Bosowa Maros yang berlokasi di Garongkong, Kabupaten Barru serta parameter tanah granular sebagai material *embankment* dan *sludge lock* dan juga parameter desain geotekstil yang diperoleh dari studi literatur. Kemudian memodelkan *embankment* dan menganalisa secara numerik deformasi horisontal yang terjadi dengan menggunakan program Plaxis.

#### **3.2. Rancangan Penelitian**

Analisis deformasi horizontal pada pondasi tanah lunak dengan perkuatan tanah granular ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan program komputer Plaxis. Namun sebelum menganalisis deformasi horisontal yang terjadi, penelitian ini dimulai dengan melakukan kajian pustaka dari beberapa buku dan jurnal yang berhubungan dengan penelitian deformasi pada tanah lunak yang dilanjutkan dengan mengumpulkan parameter lapisan tanah lunak serta parameter tanah granular sebagai material *embankment* dan *sludge lock*, dan juga parameter desain geotekstil yang akan dipakai selama proses penelitian. Selanjutnya merancang model *embankment* dan juga model perkuatan *sludge lock*, dan memodelkan *embankment* dan *sludge lock* tersebut pada program plaxis yang

diikuti dengan menginput parameter lapisan tanah lunak, tanah granular, serta geotextile. Untuk prosedur penelitian lebih jelasnya dapat dilihat pada diagram alir (flowchart) berikut;



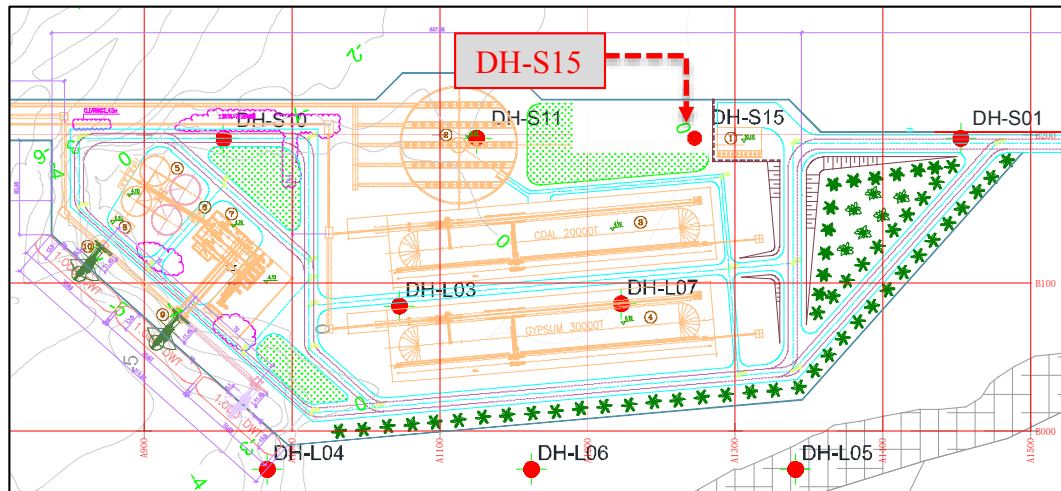
Gambar 12. Diagram alir (*flowchart*) prosedur penelitian.

### 3.3. Parameter Desain Tanah dan Geotekstil

#### 3.3.1. Parameter Teknis Tanah Lunak

Profil dan parameter tanah lunak yang dipergunakan, didapat dari uji lapangan dan uji laboratorium proyek pembangunan *Clinker Handling Terminal* PT. Semen Bosowa Maros yang berlokasi di Garungkong, Kabupaten

Baru khususnya tanah yang berada pada titik boring DH-S15 dari proyek tersebut.



Gambar 13. Letak titik boring DH-S15 proyek pembangunan *Clinker Handling Terminal* PT. Semen Bosowa Maros

Tabel 8. Tabel Profil Tanah Hasil Boring Pada Titik DH-S15

Jenis Tanah	Batas Lapisan Atas (m)	Batas Lapisan Bawah (m)	Ketebalan (m)
Clayey Silt	0	-2.50	2.50
Soft Clay I	-2.50	-17.00	14.50
Soft Clay II	-17.00	-23.00	6.00
Clay Stone	-23.00	~	~

Berdasarkan hasil pengujian di lapangan dan di laboratorium serta referensi dari spesifikasi tanah, maka parameter tanah lunak yang akan digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 9. Parameter Teknis Tanah Lunak

Project	Clinker Handling Terminal PT. Semen Bosowa Maros			Unit
Boring Number	DH-S15			
Depth (m)	1.50-2.00 m (UDS)	7.50-8.00 m (UDS)	17.00-17.50 m (UDS)	
Soil Type				
USCS	ML	CL	CL	
Indeks Properties				
Water content (W)	40.03	43.37	45.17	%
Unit Weight (γs)	1.57	1.58	1.56	gr/cm³
Specific Gravity (GS)	2.65	2.65	2.66	
Liquid Limit (LL)	42.45	46.82	43.11	%
Plastic Limit (PL)	41.23	29.89	29.70	%

Shrinkage Limit (SL)	27.00	28.35	28.71	%
Plasticity Index (PI)	1.22	16.93	13.41	%
Mass Passing no. 40	100.00	95.20	93.62	%
Mass Passing no. 200	51.70	52.21	52.52	%
Uniform Coefficient (Cu)	6.15	6.28	6.25	
Gradation Coefficient (Cc)	0.16	0.16	0.16	
<b>Mechanical Properties</b>				
Cohesion (Cu) <sup>1</sup>	4.076	16.302	16.302	kN/m <sup>2</sup>
Internal Friction (Ø) <sup>2</sup>	15	20	20	°
Permeability (k) <sup>2</sup>	4.32 x 10 <sup>-4</sup>	4.32 x 10 <sup>-5</sup>	4.32 x 10 <sup>-5</sup>	m/day
Young Modulus (E) <sup>3</sup>	1.5	1.0	1.3	MPa
Poisson Ratio (v) <sup>4</sup>	0.35	0.35	0.35	-
Dilatancy angle (ψ)	0	0	0	°

1. NAFVAC, 1982

2. Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers

3. Obrzud R. & Truty, The Hardening Soil Model - A Practical Guidebook Soil.PC 100701 report, revised 31.01.2012

4. Foundation Analysis and Design (5th Edition), by J.E. Bowles, 1996 McGraw-Hill.

### 3.3.2. Parameter Material *Sludge Lock* dan *Embankment*

Parameter material *Sludge Lock* dan *Embankment* diperoleh dari hasil penelitian “*Modelling Horizontal Soil Deformations*” oleh Coen te Boekhorst. Adapun parameter tanah granular yang digunakan pada penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 10. Parameter Tanah Granular Pengisi *Sludge Lock* dan *Embankment*

Parameter	Hasil Pemeriksaan		Unit
	Embankment	Sludge Lock	
Specific weight			
a. $\gamma_{\text{dry}}^1$	14.7	16.5	kN/m <sup>3</sup>
b. $\gamma_{\text{sat}}$	17.2	21	kN/m <sup>3</sup>
Permeability (k)	1	3.456	m/day
Young Modulus (E) <sup>2</sup>	15000	80000	kN/m <sup>2</sup>
Poisson Ratio (v)	0.2	0.2	-
Cohession (Cu)	0.0	-	kN/m <sup>2</sup>
Internal Friction ( Ø )	30	-	°
Dilatancy angle (ψ)	0	-	°

1. Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers

2. Based on Obrzud & Truty 2012 complied from Kezdi 1974 and Prat et al. 1995

### 3.3.3. Parameter Desain Geotextile

Selain digunakan sebagai bahan perkuatan tanah, geotekstil juga digunakan pada penelitian ini untuk mencegah material *Sludge Lock* menyatu dengan tanah lunak yang ada dibawahnya. Parameter Geotekstil yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

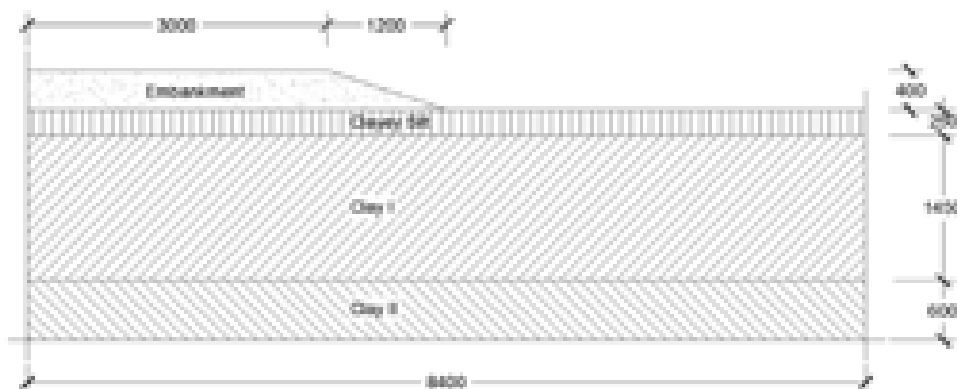
Table 11. Parameter geotekstil GT100-I

Physical Properties	Test Method	GT200-II	Units
Material	High Strength Polyester Yarns Coated with Durable Polymer		
<b>Mechanical Index Properties</b>			
Tensile Strength , $T_{ult}$ - MD min	ASTM D4595	100	kN/m
Tensile Strength , $T_{ult}$ - CD min	D4595	50	kN/m
Elongation - MD	D4595	10	%
<b>Long Term Design Strength, (120 years), for sandy gravel</b>	Calculated based on FHWA-NHI-00-043. The long-term design strength is determined by compounding the reduction factors for creep, installation damage, and environmental effects.	<b>49</b>	<b>kN/m</b>

### 3.4. Tahapan Pelaksanaan Peneltian

#### 3.4.1. Model *Embankment* Tanpa Perkuatan

Untuk menguji deformasi horisontal yang terjadi pada tanah lunak proyek pembangunan *Clinker Handling* Terminal PT. Semen Bosowa Maros yang berlokasi di Garongkong, Kabupaten Barru, maka akan dimodelkan sebuah *embankment* dengan ketinggian 4 m dan lebar kaki 12 m (1V:3H) di atas tanah lunak pada proyek tersebut.



Gambar 14. Model *embankment* tanpa perkuatan (Model A)

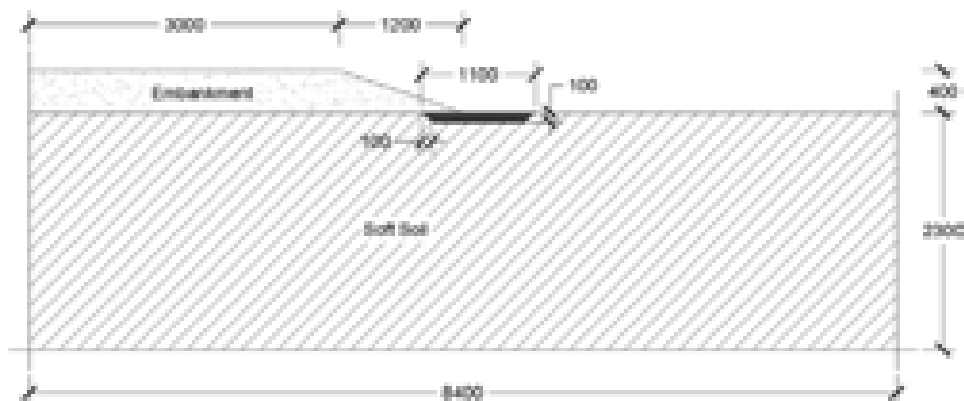
Pada tahap konstruksi dari *embankment* ketinggian 4 meter tersebut akan dibagi dalam empat tahap seperti pada tabel dibawah ini:

Tabel 12. Tabel Lapisan Tanah *Embankment*

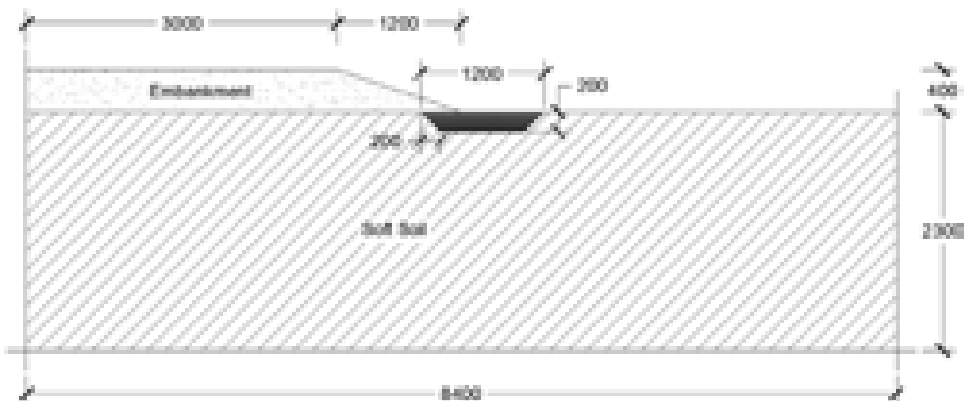
Lapisan tanah <i>Embankment</i>	Batas Lapisan Bawah (m)	Batas Lapisan Atas (m)	Ketebalan (m)
Lapisan 1	0	1.0	1.0
Lapisan 2	1.0	2.0	1.0
Lapisan 3	2.0	3.0	1.0
Lapisan 4	3.0	4.0	1.0

### 3.4.2. Model *Embankment* dengan Perkuatan

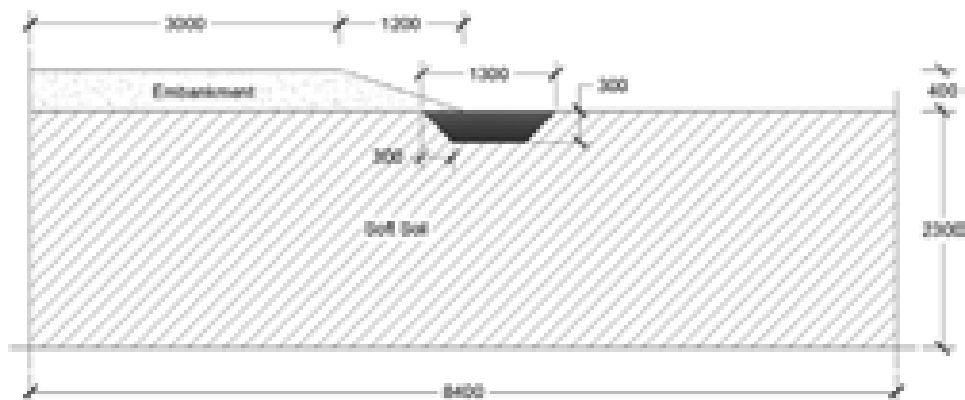
Pada penelitian ini akan digunakan beberapa model perkuatan tanah untuk membandingkan hasil uji deformasi horisontal yang terjadi pada tanah lunak. Beberapa model yang akan digunakan antara lain:



Gambar 15. Model *embankment* dengan perkuatan *Sludge Lock* kedalaman 1 m pada toe *embankment* (Model B) dengan bagian miring 1V:1H



Gambar 16. Model *embankment* dengan perkuatan *Sludge Lock* kedalaman 2 m pada toe *embankment* (Model C) dengan bagian miring 1V:1H



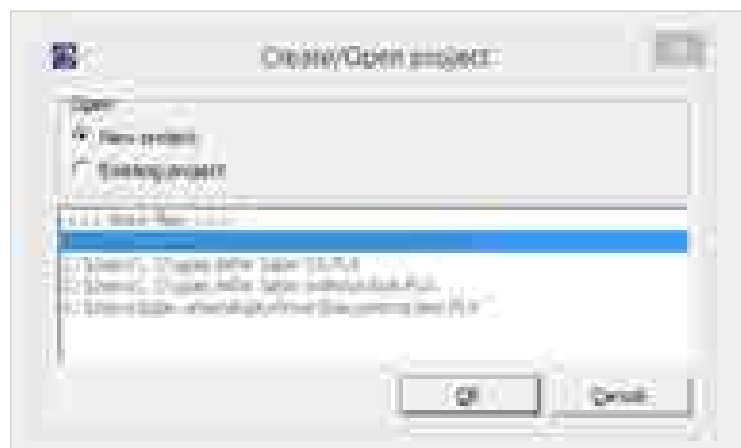
Gambar 17. Model *embankment* dengan perkuatan *Sludge Lock* kedalam 3 m pada toe *embankment* (Model D) dengan bagian miring 1V:1H

### 3.4.3. Simulasi Numerik dengan Program Plaxis

Dalam menganalisa deformasi yang terjadi pada tanah lempung dalam penelitian ini digunakan metode elemen hingga dengan menggunakan program Plaxis. Plaxis adalah suatu analisa program berbasis metode elemen hingga yang memudahkan analisis geoteknik sehingga didapatkan parameter-parameter perencanaan yang dibutuhkan. Secara garis besar tahapan permodealan dan analisis menggunakan PLAXIS terdiri dari:

a. Membuat file baru

Buka program Plaxis, pilih “new project” kemudian klik OK



Gambar 18. Pilihan pembuatan proyek baru pada program Plaxis V 8.5



### b. *General Setting*

Dalam hal ini, penamaan proyek yang akan kita gunakan dan metode analisa yang dipakai. Merujuk pada permasalahan yang ada di penelitian ini maka pada menu *drop down* pada *general option*, pilih model *plain strain* dan element 15 *nodes*. Model plane strain digunakan dengan asumsi bahwa sepanjang sumbu potongan melintang penampang dipandang relatif sama dan peralihan dalam arah tegak lurus potongan tersebut dianggap tidak terjadi.



Gambar 19. Tampilan Menu *General Setting* pada Plaxis

Yang harus dilakukan pada bagian *tabsheet dimensions* adalah:


- Menentukan standar unit yang digunakan untuk panjang, gaya, dan waktu.

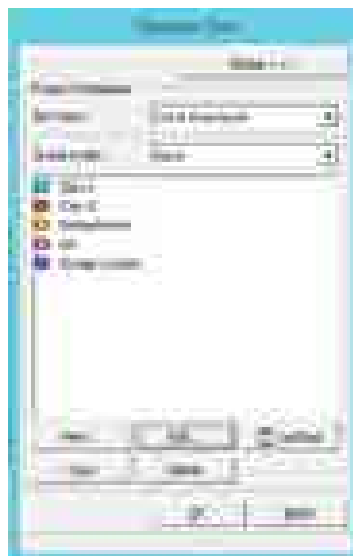
- Menentukan batas ruang kerja dalam menggambar geometri untuk mempermudah penggambaran. Dan juga, menentukan spasi grid & interval yang ingin digunakan. Semakin kecil spasi, maka titik bantu akan semakin banyak.
- Klik OK.

#### c. Penggambaran Model Penelitian

Setelah pengaturan general setting, pembuatan model di layar kerja plaxis dapat dikerjakan. Fungsi line digunakan sebagai geometri garis untuk menggambarkan profil 2D dari penggambaran model, Geogrid untuk menggambarkan geogrid yang akan digunakan pada model tersebut, dan standard fixities untuk memberikan batasan bidang analisis pada plaxis.

#### d. Pengaturan Material Set

Sebelum melakukan generate mesh, terlebih dulu semua geometri yang digambar di Plaxis harus dipastikan telah diberi input material menggunakan material set  , sehingga akan muncul dialog seperti di bawah ini:



Gambar 20. Tampilan Menu *Material Sets* untuk membuat dan mengatur material.

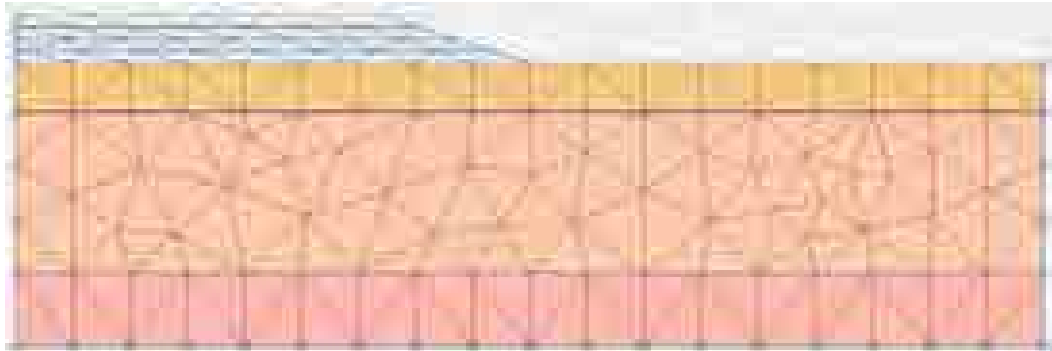
Permasalahan didalam penelitian adalah material lempung lunak. Bila pengaturan model material dianggap soft soil model maka nilai dari koefisien konsolidasi ( $C_v$ ) dan koefisien kembang-susut ( $C_s$ ) harus diketahui, namun karena penelitian konsolidasi tidak dilakukan maka untuk penelitian ini digunakan model material Mohr Coulumb dengan tipe undrained dengan sifat mekanis dari material tersebut diambil dari referensi dan parameter dari sifat mekanis tanah yang telah teruji. Untuk mengetahui pengaruh tegangan air pori, maka tipe material yang digunakan haruslah *undrained*. Sedangkan material pengisi *embankment* dan *Sludge Lock* yang digunakan berdasarkan dari lapisan pasir maka material model yang digunakan adalah Mohr Coulomb dengan material type *drained*.



Gambar 21. Tampilan menu pengaturan material dan parameter lapisan tanah.

#### e. Pengaturan Meshing

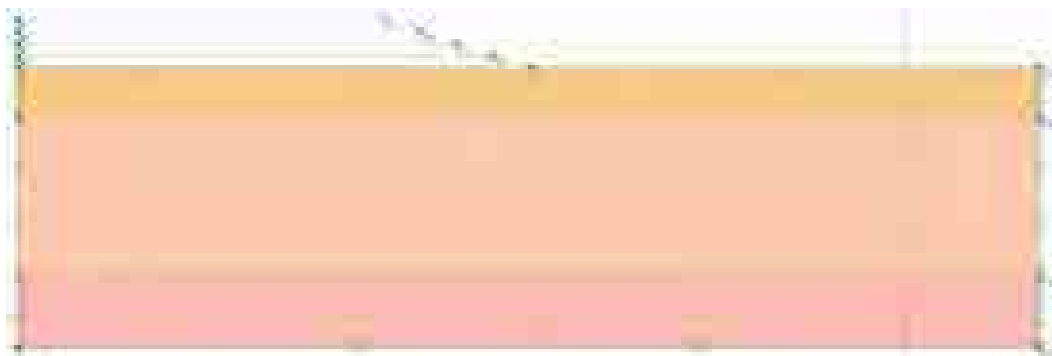
Setelah material sudah terinput dalam geometri model, maka material sudah siap untuk dilakukan analisis. Sebelum itu, langkah harus dilakukan adalah generate mesh yang artinya mengatur titik-titik analisa. Analisa plaxis berdasarkan suatu proses yang disebut iterasi. Jadi semakin halus tingkatan mesh yang dipilih, maka semakin banyak proses iterasi sehingga tindakan analisis hampir mendekati kesalahan terkecil.



Gambar 22. Tampak lapisan tanah yang telah di isi dengan material dan telah di “generate mesh”.

#### f. Tahapan *Initial Condition*

Bilamana mesh telah digenerate, maka model sudah siap untuk dianalisa. Langkah analisa pertama adalah menentukan keadaan awal suatu lapisan tanah sebelum semua beban dan perkuatan bekerja. Langkah ini yang disebut Initial Condition. Didalam fase inilah, pengaturan muka air tanah, batas analisa konsolidasi dan prosedur tekanan tanah diam (KO) atau gravity loading dapat dilakukan. Semua struktur luar seperti cerucuk, preloading, drain haruslah dalam keadaan off (tampilan abu-abu pada layar) bilamana untuk memberikan isyarat bahwa tahapan ini merupakan tahapan asli dari tanah.



Gambar 23. Ilustrasi Tahapan Initial Condition

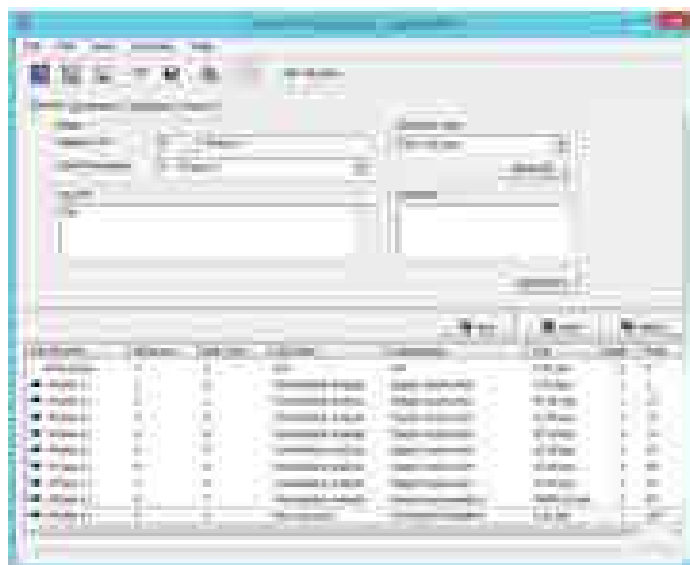
#### g. Tahapan Kalkulasi

Ditahapan ini, semua aktifitas yang akan dilakukan kepada deposit tanah diandaikan disini. Selayaknya suatu pekerjaan proyek yang mengenal divisi-divisi

pekerjaan, di program plaxis ini, tahapan analisa bisa diatur sesuai dengan tahapan pekerjaan. dikarenakan penelitian ini berguna sebagai metode perbaikan tanah dengan cara konsolidasi tanah dasar yaitu tanah lunak agar dapat mampu menahan beban diatasnya. Maka tipe kalkulasi yang digunakan hendaknya menggunakan analisa konsolidasi. Didalam tahapan analisis konsolidasi, bisa ditentukan waktu tempuh untuk mendapatkan waktu pemampatan yang direncanakan sehingga diperkirakan tanah akan mampu untuk memikul tegangan yang terjadi. Pada tahap konstruksi *embankment*, setiap lapisan tanah akan dibagi dalam dua tahap konstruksi yaitu tahap menimbun dan konsolidasi, detail mengenai tahap konstruksi tersebut seperti tabel dibawah ini:

Tabel 13. Tahapan Kontruksi Lapisan Tanah *Embankment*

Lapisan Tanah <i>Embankment</i>	Menimbun	Konsolidasi
Sludge Lock	5 hari	-
Lapisan 1	5 hari	45 hari
Lapisan 2	5 hari	45 hari
Lapisan 3	5 hari	45 hari
Lapisan 4	5 hari	Tekanan pori minimum



Gambar 24. Tampilan *Calculation Phase*

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Karakteristik Material Tanah dan *Sludge Lock*

Permodelan yang dilakukan dalam penelitian ini setelah mengetahui karakteristik dari tanah dasar dan material *embankment* dan *Sludge Lock*, selanjutnya dianalisa melalui program PLAXIS V 8.5. Tujuan dari analisa ini adalah untuk mengetahui pengaruh perkuatan tanah granular dengan metode *Sludge Lock* yang akan diaplikasikan terhadap tanah lunak melalui analisa numerik PLAXIS. Parameter tanah dasar, tanah *embankment*, material pengisi *Sludge Lock* dan spesifikasi geotekstil yang dimasukkan pada program Plaxis seperti pada tabel dibawah ini:

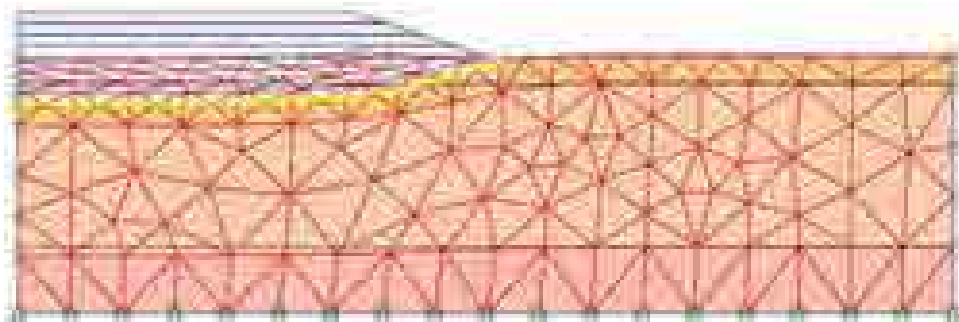
Tabel 14. Parameter Material Tanah yang digunakan Pada Program Plaxis

Parameter	Material					Unit
	Clayey Silts	Clay I	Clay II	Sand ( <i>Embankment</i> )	Sandy Gravel ( <i>Sludge Locked</i> )	
Material Model	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Linear-Elastic	-
Type of Material Behavior	undrained	undrained	undrained	drained	drained	-
Soil Unit Weight Above Phreatic Level ( $\gamma_{unsat}$ )	12.5	11.5	11.5	14.7	16.5	kN/m <sup>3</sup>
Soil Unit Weight Below Phreatic Level ( $\gamma_{sat}$ )	15.4	15.5	15.3	17.2	21.0	kN/m <sup>3</sup>
Permeability in Horizontal Direction ( $k_x$ )	$4.32 \times 10^{-4}$	$4.32 \times 10^{-5}$	$4.32 \times 10^{-5}$	1	3.456	m/day
Permeability in Vertical Direction ( $k_y$ )	$4.32 \times 10^{-4}$	$4.32 \times 10^{-5}$	$4.32 \times 10^{-5}$	1	3.456	m/day

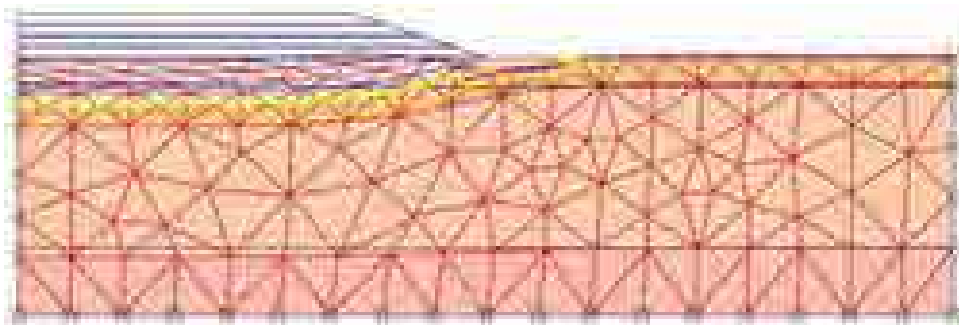
Young's Modulus ( $E_{ref}$ )	1500	1000	1300	15000	80000	kN/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio ( $\nu$ )	0.350	0.350	0.350	0.200	0.200	-
Cohesion ( $C_{ref}$ )	4.076	16.302	16.302	0	-	kN/m <sup>2</sup>
Friction angle ( $\phi$ )	15	20	20	30	-	°
Dilatancy angle ( $\Psi$ )	0.0	0.0	0.0	0.0	-	°
Strength Reduction Factor Interface $R_{inter}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-

Berdasarkan hasil penelitian di lapangan didapatkan bahwa material tanah dasar dari proyek pembangunan *Clinker Handling Terminal* PT. Semen Bosowa Maros ini umumnya ditutupi oleh tanah berjenis lempung lunak. Seperti yang diketahui bahwa tanah lempung lunak ini kurang baik menjadi tanah dasar karena dapat menimbulkan deformasi yang besar baik secara vertikal maupun secara horisontal apabila memikul beban yang besar. Beban ini berasal dari bangunan di atasnya yang dalam hal ini adalah *embankment* yang akan dibangun dengan ketinggian 4 m dengan berat 14.7 kN/m<sup>3</sup> pada keadaan *unsaturated* dan 17.2 kN/m<sup>3</sup> pada keadaan *saturated*. *Embankment* tersebut dibangun dengan menggunakan material pasir, dimana pasir memiliki kuat geser yang tinggi sehingga sangat baik sebagai material timbunan. Namun karena tanah dasar yang kurang baik dalam mendukung beban di atasnya maka dibuat model perkuatan untuk mendukung beban di atasnya. Perkuatan yang dipakai menggunakan metode *Sludge Lock* dimana pada tanah lunak yang berada di kaki *embankment* digali dan

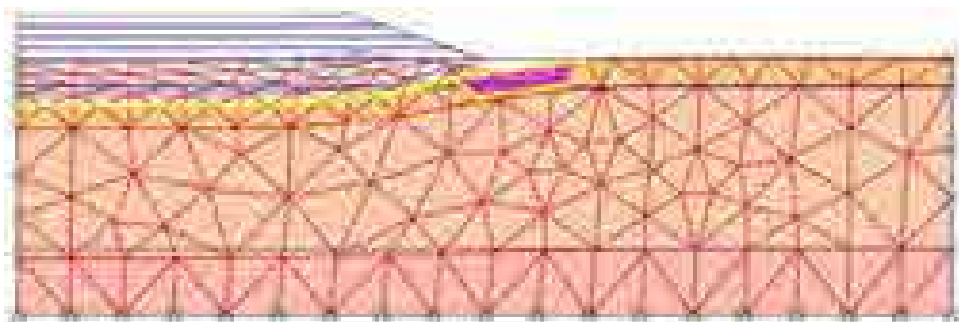
digantikan dengan tanah granular. Tanah granular ini merupakan kombinasi antara tanah granular Kelas A dan Kelas 1 menurut sistem AASHTO. Kombinasi tanah granular ini digunakan karena sifat dari tanah granular yaitu semakin besar dan kasar permukaan butirannya maka semakin besar kuat gesernya, sehingga dapat menjadi perkuatan yang baik dalam mendukung *embankment* di atasnya. Berikut adalah gambar dari bentuk deformasi yang terjadi pada setiap model dengan atau tanpa adanya perkuatan:



Gambar 25. Deformed mesh dari model geometri tanpa perkuatan (Model A)

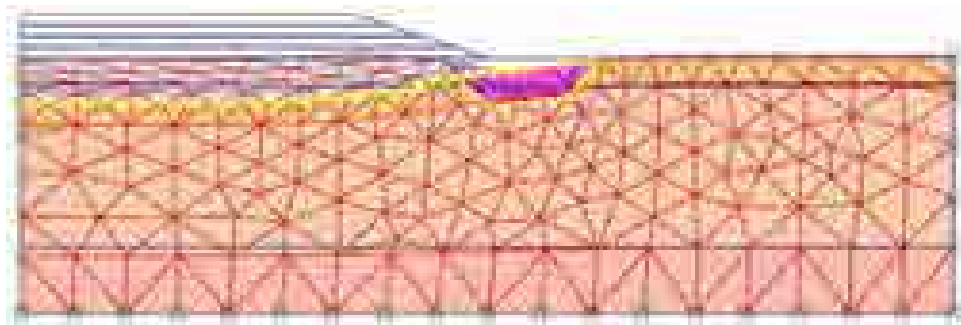


Gambar 26. Deformed mesh dari model perkuatan Sludge Lock kedalaman 1m (Model B)



Gambar 27. Deformed mesh dari model perkuatan Sludge Lock kedalaman 2m (Model C)



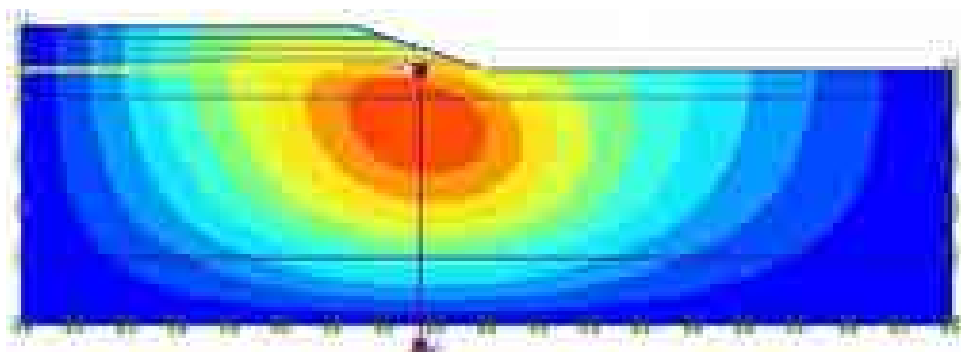


Gambar 28. Deformed mesh dari model perkuatan Sludge Lock kedalam 3m (Model D)

#### 4.2 Deformasi Numerik Lateral *Embankment* Tanpa Perkuatan

Setelah dilakukan permodelan dan tahapan kalkulasi menggunakan program plaxis V 8.5 maka dapat digambarkan shading deformasi pada daerah-daerah yang mengalami deformasi horisontal.

Berdasarkan gambar 29 dapat dilihat bahwa deformasi horisontal terbesar umumnya terjadi pada tanah lunak yang berada pada daerah bawah kaki *embankment*.



Gambar 29. Shading deformasi horisontal untuk Model A

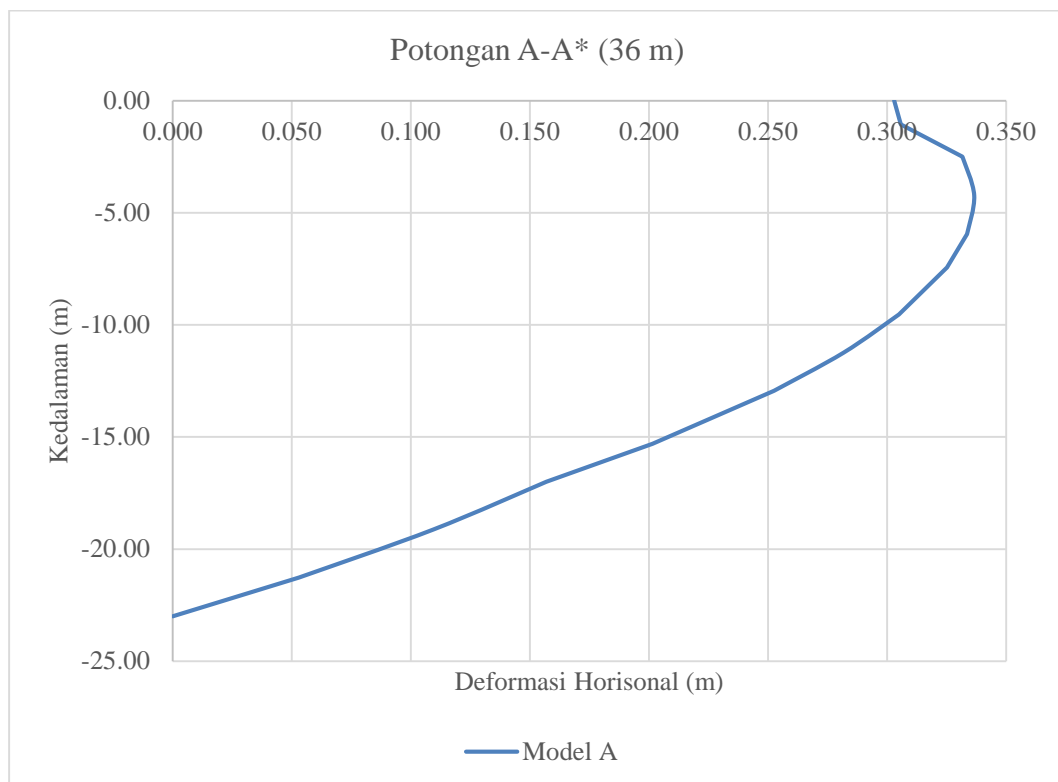
Setelah hasil deformasi horisontal yang program Plaxis telah didapatkan kemudian dilakukan potongan membujur atau *cross section* pada lapisan tanah lunak dibawah *embankment* yang diberi simbol A-A\* dengan jarak 36m dari titik awal setiap model perkuatan untuk mendapatkan hasil deformasi horisontal

yang terjadi pada jarak tersebut. Hasil deformasi horisontal terbesar pada model A dirangkum pada tabel dibawah ini:

Tabel 15. Hasil deformasi horisontal terbesar potongan jarak 36m (A-A\*) pada Embankment tanpa perkuatan

Model	Horizontal Displacement (Ux) m
	Potongan Model A-A*
A	0.3365

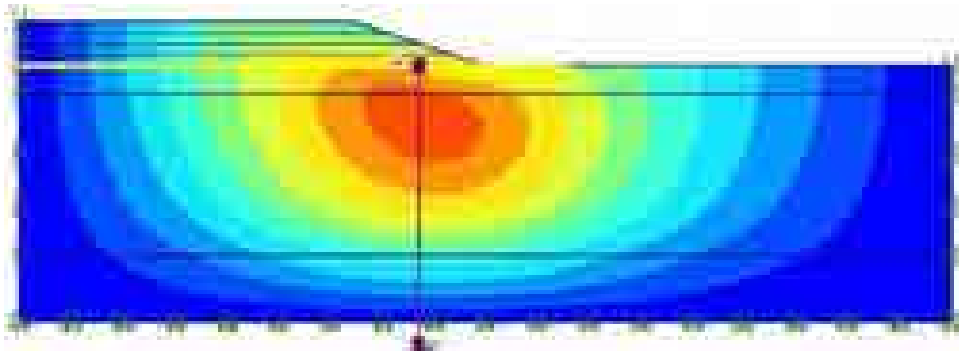
Berdasarkan tabel hasil deformasi horisontal (lampiran) dari setiap model perkuatan pada jarak yang telah ditentukan, kemudian dimasukkan kedalam grafik untuk dapat membandingkan setiap hasil deformasi horisontal dan besar perkuatan dari berbagai model perkuatan tersebut.



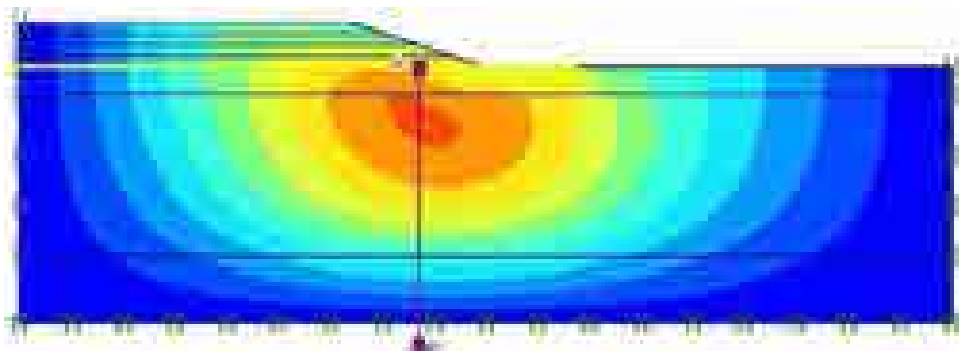
Gambar 30. Grafik hubungan deformasi horisontal terhadap kedalaman tanah lunak pada embankment tanpa perkuatan potongan jarak 36 m (A-A\*)

#### 4.3 Deformasi Numerik Lateral *Embankment* dengan Geotekstil – *Sludge Lock*

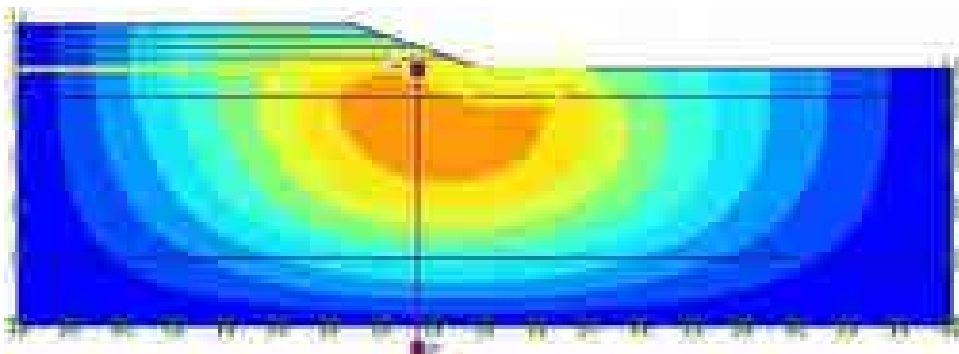
Setelah dilakukan permodelan dan tahapan kalkulasi menggunakan program plaxis V 8.5 maka dapat digambarkan shading deformasi pada daerah-daerah yang mengalami deformasi horisontal.



Gambar 31. Shading deformasi horisontal untuk Model B



Gambar 32. Shading deformasi horisontal untuk Model C



Gambar 33. Shading deformasi horisontal untuk Model D

Berdasarkan gambar 31 sampai dengan 33 dapat dilihat bahwa deformasi horisontal terbesar umumnya terjadi pada tanah lunak yang berada pada daerah bawah kaki *embankment*.

Setelah hasil deformasi horisontal yang program Plaxis V.8.5 telah didapatkan kemudian dilakukan potongan membujur atau *cross section* yang diberi simbol A-A\* pada lapisan tanah lunak dibawah *embankment* dengan jarak 36m dari titik awal setiap model perkuatan untuk mendapatkan hasil deformasi horisontal yang terjadi pada jarak tersebut. Hasil deformasi horisontal terbesar pada setiap jarak tadi dan persentase reduksi displacement dari setiap model dirangkum pada tabel dibawah ini:

Tabel 16. Hasil deformasi horisontal terbesar di setiap potongan pada tanah lunak dengan berbagai model perkuatan

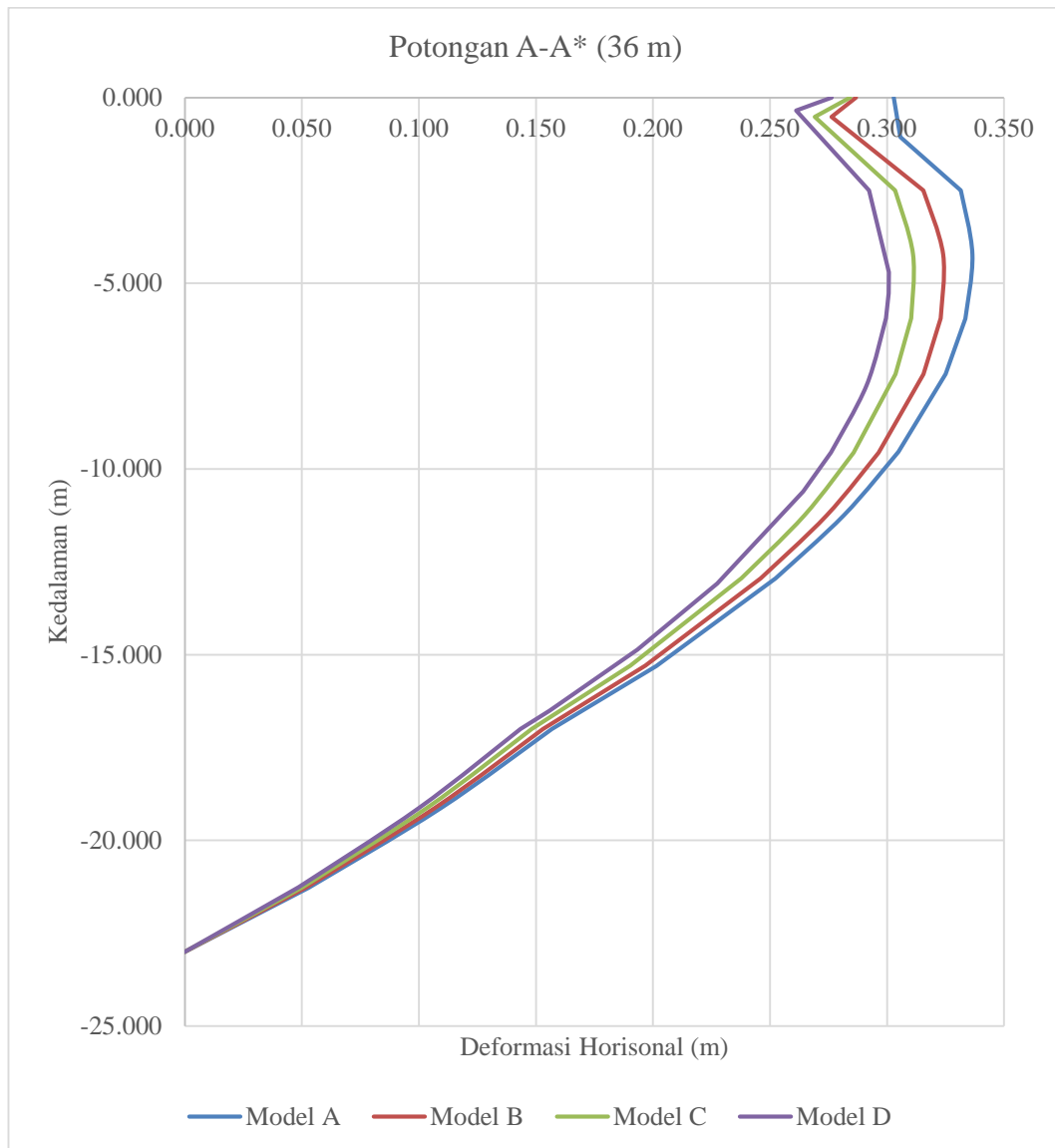
Model	Horizontal Displacement (Ux) m
	Potongan Model A-A*
<b>B</b>	0.3240
<b>C</b>	0.3111
<b>D</b>	0.3008

Tabel 17. Persentasi reduksi displacement berbagai model perkuatan

Model	Persentasi Reduksi Displacement
	Potongan Model A-A*
<b>B</b>	3.730%
<b>C</b>	7.546%
<b>D</b>	10.607%

Berdasarkan tabel hasil deformasi horisontal (lampiran) dari setiap model perkuatan pada jarak yang telah ditentukan, kemudian dimasukkan

kedalam grafik untuk dapat membandingkan setiap hasil deformasi horisontal dan besar reduksi deformasi horisontal dari berbagai model perkuatan tersebut.



Gambar 34. Grafik hubungan deformasi horisontal terhadap kedalaman tanah lunak berbagai model perkuatan pada potongan jarak 36m (A-A\*)

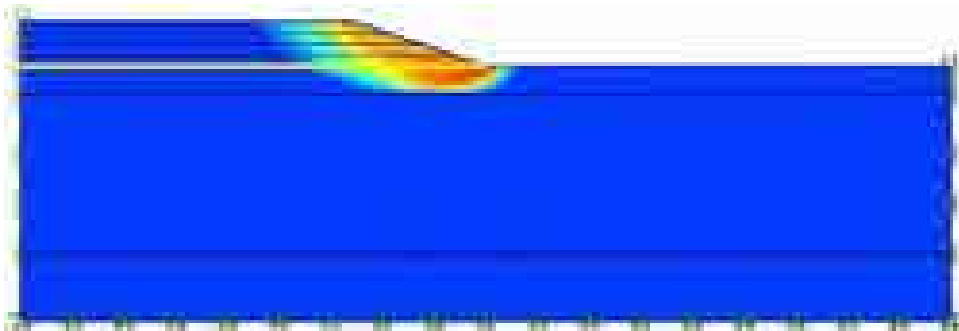
Selama proses pembangunan embankment, tidak hanya deformasi horisontal yang terjadi pada embankment yang didapatkan, namun juga waktu konsolidasi yang dibutuhkan embankment. Adapun waktu konsolidasi yang dibutuhkan pada embankment untuk masing-masing perkuatan yaitu:

Tabel 18. Waktu konsolidasi pada embankment untuk masing-masing model perkuatan.

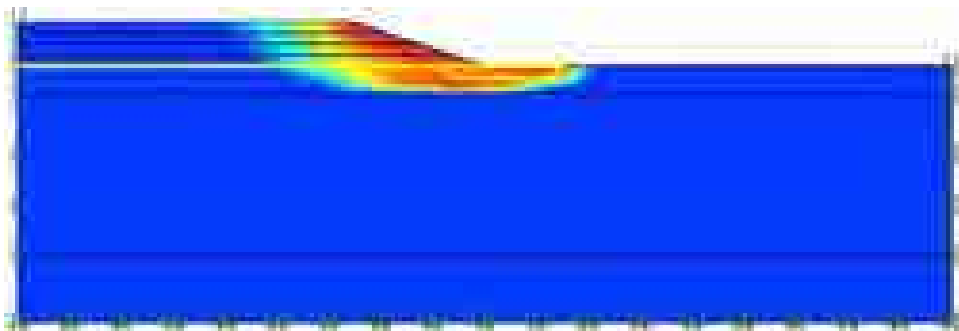
Model Perkuatan	Waktu Konsolidasi
Model A	33611 hari
Model B	30994 hari
Model C	31240 hari
Model D	32057 hari

#### 4.4 Stabilitas Model *Embankment* Tanpa dan dengan *Sludge Lock*

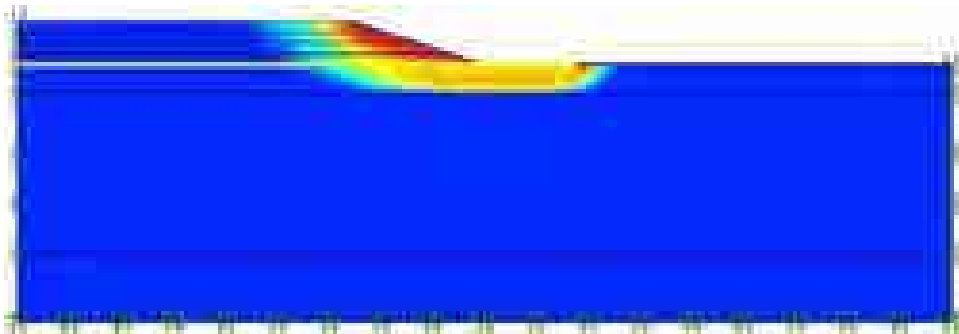
Untuk menganalisa stabilitas dari embankment maka pada tahapan kalkulasi ditambahkan perhitungan *phi/c-reduction*. Selama perhitungan *phi/c-reduction* tambahan *displacement* diberikan. *Total displacement* tidak memiliki arti fisik, namun *incremental displacement* pada tahap akhir (*failure*) memberikan indikasi seperti apa mekanisme kegagalan yang akan terjadi



Gambar 35. *Shading* dari *total displacement increment* yang mengindikasikan mekanisme kegagalan yang dapat terjadi pada tahap akhir pembangunan *embankment* Model A



Gambar 36. *Shading* dari *total displacement increment* yang mengindikasikan mekanisme kegagalan yang dapat terjadi pada tahap akhir pembangunan *embankment* Model B



Gambar 37. *Shading* dari *total displacement increment* yang mengindikasikan mekanisme kegagalan yang dapat terjadi pada tahap akhir pembangunan *embankment* Model C



Gambar 38. *Shading* dari *total displacement increment* yang mengindikasikan mekanisme kegagalan yang dapat terjadi pada tahap akhir pembangunan *embankment* Model D

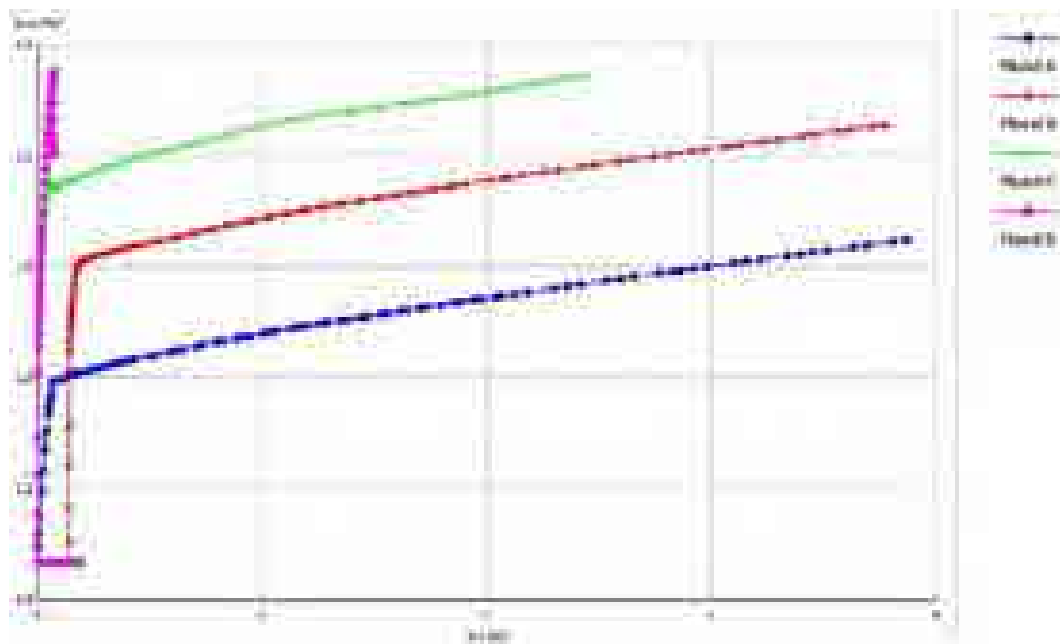
Dari hasil kalkulasi *phi/c-reduction* didapatkan analisa keamanan yang ada dari setiap model perkuatan yang terjadi. Tabel di bawah ini memberikan hasil rekapitulasi *phi/c-reduction* dari setiap model perkuatan:

Table 19. Hasil *phi/c-reduction* dari *Embankment* dengan berbagai model perkuatan.

Model	Hasil <i>phi/c-reduction</i>
A	1.8722
B	2.1813
C	2.3160
D	2.1140

Didapatkan bahwa hasil *phi/c-reduction* dari model embankment yang diberi perkuatan sludge lock menambah angka faktor keamanan dari embankment

tersebut yaitu dikisaran angka 2,114 – 2,316. Menurut Bowles (1989) untuk faktor keamanan diatas 1,25 memiliki intensitas kelongsoran jarang atau lereng relatif stabil. Untuk perbandingan *hasil phi/c-reduction* yang lebih jelas dapat dilihat pada kurva dibawah ini:



Gambar 39. Kurva Evaluasi dari hasil *phi/c-reduction* pada pembangunan dengan berbagai model perkuatan



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil analisa numerik menggunakan Plaxis 8.5 dapat diketahui bahwa perkuatan tanah lunak pada pembangunan *embankment* proyek *Clinker Handling Terminal* PT. Semen Bosowa Maros dengan menggunakan tanah granular metode *Sludge Lock* dapat mereduksi nilai deformasi horisontal yang terjadi pada tanah lunak dari pembangunan *embankment* tersebut. Setiap penambahan kedalaman dari perkuatan tanah lunak menggunakan tanah granular metode *Sludge Lock* memberikan hasil perkuatan yang lebih baik dimana pada *Sludge Lock* dengan kedalaman 1 meter dan lebar 11 meter dapat mereduksi 3.730% deformasi horisontal yang terjadi, pada *Sludge Lock* dengan kedalaman 2 meter dan lebar 12 meter dapat mereduksi 7.546% deformasi horisontal yang terjadi, dan pada *Sludge Lock* dengan kedalaman 3 meter dan lebar 13 meter dapat mereduksi 10.607% deformasi horisontal yang terjadi.
2. Tingkat stabilitas *embankment* pada tanah lunak dengan perkuatan *Sludge Lock* menunjukkan hasil yang lebih baik bila dibandingkan dengan *embankment* tanpa perkuatan *sludge lock*. Hasil kalkulasi *phi/c-reduction* dari model *embankment* tanpa perkuatan berada pada angka 1,8722. Untuk model *embankment* dengan perkuatan *Sludge Lock* kedalaman 1

meter dan lebar 11 meter berada pada angka 2.1813. Untuk model embankment dengan perkuatan *Sludge Lock* kedalaman 2 meter dan lebar 12 meter berada pada angka 2.3160. Untuk model embankment dengan perkuatan *Sludge Lock* kedalaman 1 meter dan lebar 13 meter berada pada angka 2.1140. Menurut Bowles (1989) untuk faktor keamanan diatas 1,25 memiliki intensitas kelongsoran jarang atau lereng relatif stabil.

## **5.2. Saran**

Beberapa saran yang dapat dilakukan untuk penyempurnaan hasil analisa deformasi horisontal dengan perkuatan tanah granular metode *Sludge Lock* ini yaitu:

1. Perlu diadakan pengujian di laboratorium untuk mendapatkan *mechanical properties* tanah agar didapatkan hasil penelitian yang lebih akurat.
2. Perlu diadakan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui efektifitas dari perkuatan tanah granular metode *Sludge Lock* bila ketinggian embankmentnya ditambah ataupun dikurangi.
3. Perlu diadakan pengujian langsung menggunakan permodelan di laboratorium dengan harapan dapat membanding besaran hasil yang akan digunakan sebagai patokan perencanaan kedepannya.
4. Disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut dengan membandingkan metode *Sludge Lock* dengan metode-metode perkuatan tanah lunak yang lain seperti metode kolom granular, agar didapatkan metode yang paling efektif untuk perkuatan tanah terhadap deformasi horisontal kedepannya.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM, (1992), ASTM Stabilisation With Admixture, American Society For Testing And Materials, Second Edition.
- A. Zahmatkesh & A. J. Choobbasti, (2010) Settlement evaluation of soft clay reinforced by stone columns, considering the effect of soil compaction. Journal IJRRAS Volum 3 (2), hal 159-166.
- Boekhorst, C.W.J. (2010), Modelling horizontal soil deformations, Validation of the state of the art models with in-situ measurements, Papendrecht.
- Bowles, J.E. (1993), Alih Bahasa Ir.Johan Kelana Putra Edisi Kedua, Sifat-Sifat Fisis Dan Geoteknis Tanah, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Bowles, J.E. (1983), Engineering Properties of Soils and Their Measurement, Mc.Grawhill Book Company , Singapore.
- Bowles, J.E. (1996), Foundation Analysis and Design (5th Edition), McGraw-Hill, New York
- British Standards Institute. BS8006:1995: Code of Practice for Strengthened/Reinforced soils and other fills.
- Budi, G. S. (2011), Pengujian Tanah di Laboratorium, Graha Ilmu, Surabaya.
- Craig, R.F. (1991), Mekanika Tanah. Diterjemahkan oleh Budi Susilo. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Das, Braja M. (1995), Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid I, Erlangga, Jakarta.
- Hardiyatmo, C. H. (2010), Mekanika Tanah 1, Gadjah Mada University Press, Jakarta.
- Hairulla. (2013), Model Embankment Dengan Perkuatan Sekat Kolom Menerus Pasir Semen Pada Deposisi Tanah Lempung Kepasiran, Makassar.
- Harianto, T., Samang, L., Zubair, A. dan Teodorus. A. (2010), Efektifitas Pondasi Raft dan Pile Dalam Mereduksi Penurunan Tanah Dengan Metode Numerik. Konferensi Nasional Teknik Sipil 4 (KoNTeks), Sanur-Bali, 2-3 Juni.
- Indrasurya, B. M. (2000), Teknologi Perbaikan Tanah Dan Alternatif Perencanaan Pada Tanah Bermasalah (Problematic Soils). Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Karstunen & Leoni (eds). (2009), Geotechnics of Soft Soils, Focus on Ground Improvement, Taylor & Francis Group, London.
- Obrzud R. & Truty (2012), The Hardening Soil Model - A Practical Guidebook Soil.PC 100701 report, revised 31.01.2012

- Poulos, H.G., E.H. Davis (1980), Pile Foundation Analysis And Design, Jhon Wiley and Sons Australia
- Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers
- Tandel Y.K, Solanki C.H dan Desai A.K, (2012) Reinforced granular column for deep soil stabilization International Journal Of Civil And Structural Engineering Volume 2, No 3, hal 720-730
- Teodoru, I.B dan Toma, I.O. (2009), Numerical Analysis of Plate Loading Test. Publicat de Universitatea Tehnica, Gheorghe Asachi din Iasi,
- Terzaghi, K (1987) Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed, Wiley, New York
- Wesley, L. D. (1977), Mekanika Tanah, Badan Penerbit Percetakan Umum, Jakarta.